EMILIANO RICCI

GUÍA TURÍSTICA DEL UNIVERSO

DESCUBRIENDO EL ESPACIO
ENTRE MUNDOS EXTRAÑOS
Y MONSTRUOS CELESTES

Alianza editorial

EMILIANO RICCI

GUÍA TURÍSTICA DEL UNIVERSO

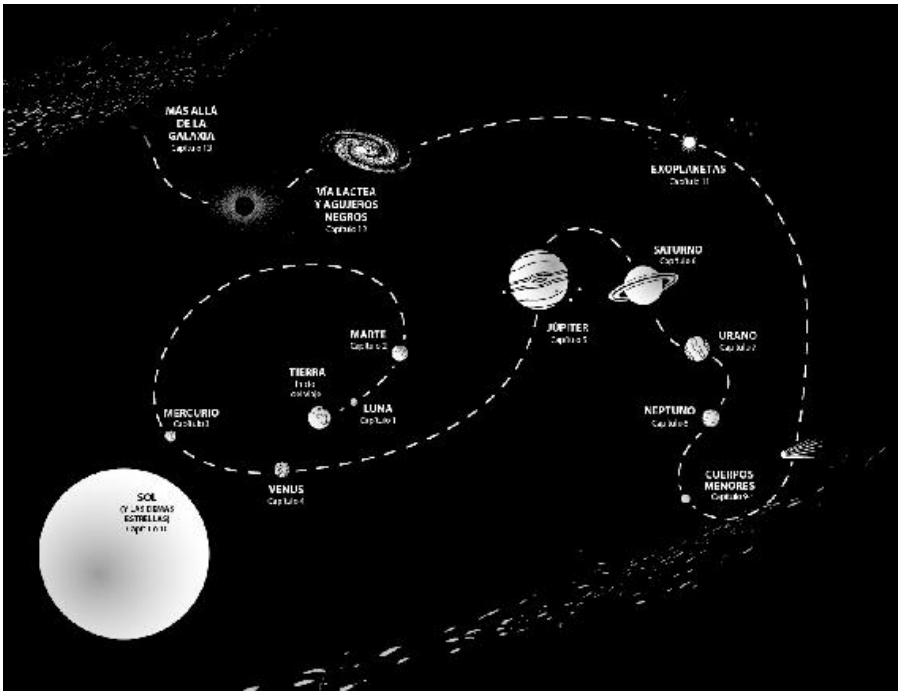
DESCUBRIENDO EL ESPACIO, ENTRE MUNDOS EXTRAÑOS Y MONSTRUOS CELESTES

Traducción de Juan Carlos Gentile Vitale

Revisión técnica a cargo de David Galadí-Enríquez (Astrónomo del Observatorio Astronómico de Calar Alto)

Alianza editorial

A mi madre


MÁS ALLÁ DE LA GALAXIA
VÍA LÁCTEA Y AGUJEROS NEGROS
EXOPLANETAS
SATURNO
JÚPITER
URANO
MARTE
TIERRA
LUNA
MERCURIO
NEPTUNO
VENUS
CUERPOS MENORES
SOL

ÍNDICE

Introducción. En marcha

Capítulo 1. Un paseo por la Luna
Moonwalk
La etapa fundamental
Otras excursiones sobre la cara visible
Ver la Tierra desde la Luna
Aventuras en la cara oculta
Bronceado de Tierra
The Dark Side of the Moon

Capítulo 2. Life on Mars?
Estar en la oposición
Nunca ha habido media estación
Tormentas de arena
Una atmósfera transparente
Agua marciana
Pero ¿los marcianos son buenos o malos?
¿Canals o Channels?
Qué ver en Marte
Los astrónomos de Laputa

Capítulo 3. Mercurio, el mundo de hielo y de fuego
Un lugar en el Sol
Un planeta huidizo
La resonancia espín-órbita
Mercurio y Luna: ¿una historia común?
Honda o no honda
Mercurio y Einstein

Capítulo 4. La diosa del amor
Un aire realmente pesado
Efecto invernadero, ¿quién era este?
Cuando el clima enloquece
Nubes tóxicas y lluvias ácidas
El día más largo... ¡y el alba al revés!

Entonces ¿por qué dedicar el planeta a la diosa del amor y de la belleza?
Los anagramas de Galileo
Venus, ¿un gemelo de la Tierra?

Capítulo 5. El gigante y su cortejo
Un largo viaje
Un planeta en color (pero ¡qué olor!)
Un océano de hidrógeno... ¡metálico!
Un tipo realmente «magnético»
A la caza de auroras polares jovianas (pero también terrestres)
La tormenta perfecta
Galileo, el anteojo y un admirable descubrimiento
Las estrellas mediceas
Tiempos de reacción
La velocidad de la luz y el Ío oculto de Rømer
Amantes (de todo género)

Capítulo 6. El verdadero «Señor de los Anillos»
El controlador del tiempo
El planeta tricorpóreo (y otros anagramas)
La promesa (mantenida) de los anillos
El satélite fallido
El planeta flotante
Titán, ¡qué atmósfera!
Los géiseres de Encélado
Hiperión, el reino del caos
«Efecto mariposa»

Capítulo 7. Urano, el planeta que rueda
El planeta nunca visto... por el ojo humano
El color y... el olor
Sideways planet
Hielo superiónico
Los gigantes de hielo
Un extraño magnetismo
¿También anillos?
Teatro, ¡qué pasión!

Capítulo 8. El dios del mar
Descubrimiento sobre el papel
Muy bien, pero ¿merece la pena visitarlo?
De un bonito color azul gélido

La compañía de Neptuno

Capítulo 9. Cuerpos menores... ¡pero muchos!
Un «corazón» de hielo
Pero ¿qué ha hecho mal?
Un perro... ¡amigo de un ratón!
A la caza del Planeta X
¿De verdad falta un planeta?
El cinturón de Kuiper
Centauros, pero sin motocicleta
¿Anunciador de desgracias?
Mensajeros del cielo
Bolas de nieve sucia

Capítulo 10. Del Sol a las demás estrellas
Pale Blue Dot
Hacia otras estrellas
La esfera de luz
Un gas en ebullición
¡Las gafas de sol no bastan!
Pero ¿cuánto tiempo durará?
¿Energía nuclear? ¡sí, gracias!
Cuántos tipos de estrellas...
Crónica de una muerte anunciada
Hijos de las estrellas
Estrellas jóvenes, estrellas viejas

Capítulo 11. Exoplanetas, ¡qué maravilla!
De acuerdo, pero ¿en torno a estrellas similares al Sol?
¡Casi un Sistema Solar!
A la caza de exoplanetas
Planetas de todo tipo
Mundos habitables
Mundos realmente extraños... ¡e inhóspitos!
El exoplaneta más cercano
El año más largo
El hado adverso
El planeta en vías de desintegración
Mundo solitario
El planeta Tatooine
La estrella desafortunada
El planeta precioso (quizá)
El planeta oscuro

El planeta de agua
¿Planeta o cometa? ¡planeta cometa!
Lluvia de rocas...
... ¡Y lluvia de hierro!
Nocturno (con *spoiler alert)*

Capítulo 12. La Vía Láctea y sus agujeros negros
La leche de Hera
Nuestra casa en el universo
La estructura de la Galaxia
Cuidado con los baches... ¡gravitatorios!
Qué es un agujero negro
Los alrededores de nuestra Galaxia

Capítulo 13. Viajes intergalácticos
Nuestra «vecina de enfrente»
La «compañía de la Galaxia»
El inconsciente descubrimiento de Messier
La primera «fotografía» de un agujero negro
En el reino de la gravedad
Números que superan lo imaginable
El yermo cósmico

Conclusión. De vuelta a casa

Post scriptum

Glosario

Bibliografía

Créditos

INTRODUCCIÓN

EN MARCHA

Antes de cualquier viaje, nos preocupamos siempre de recabar informaciones sobre el destino que vamos a visitar. Sea una ciudad de arte, un parque natural o cualquier otro lugar de nuestro planeta, lleno de maravillas y sorpresas, hay siempre un montón de cosas que es necesario o que nos place saber antes para poder disfrutar plenamente de la experiencia que estamos proyectando. Los palacios, las iglesias y los museos que visitar, pero también los mercados, los locales, los jardines, las plazas y las calles. Las plantas, los animales y los paisajes. La historia, la cultura y las tradiciones. La cocina, la música y el arte. En resumen, todas aquellas cosas que lo convierten en un lugar especial y por eso diferente de cualquier otro. Guías y atlas turísticos llenan estantes enteros de nuestras librerías, y a veces hojeamos algunos para descubrir nuevas metas o volvemos sobre las páginas de otros para recordar lugares ya visitados.

Aún son pocas, en cambio, las guías turísticas espaciales. A pesar de que hace tiempo que existen agencias de viajes interplanetarios y que diversas compañías aeroespaciales ofrecen vuelos hacia metas incluso más allá de nuestro Sistema Solar, algunas a precios competitivos, el astroturista es a menudo abandonado a su suerte en la planificación de sus vacaciones en el espacio, con el riesgo de que, en vez de disfrutar de la exploración de mundos increíbles, su experiencia pueda resultar frustrante, si no realmente peligrosa. Lo cierto es que —a pesar de que ahora un viaje interplanetario o incluso interestelar es, aunque solo respecto de un pasado reciente, extremadamente seguro para los pasajeros, con pilotos de gran experiencia y tripulaciones especialmente adiestradas, a bordo de naves espaciales con todas las comodidades típicas de un crucero— no saber con qué equipos descender a un planeta, qué trayectorias recorrer para llegar a una determinada estrella o de qué «monstruos del cielo» es oportuno mantenerse alejado puede ser literalmente letal.

El turismo espacial está ya maduro, e imaginamos que nadie quiere llegar desprevenido al propio «bautismo de vacío cósmico», que es mucho más impresionante que el «bautismo de aire», como pueden fácilmente confirmar todos aquellos que lo han vivido. Queda aclarado, pues, el motivo de esta guía. Que, a diferencia de esos atlas

—bellísimos, desde luego— en papel satinado, pesados y de gran formato, plagados de ilustraciones y esquemas, no trata de «impresionaros» con espectaculares fotografías en color de superficies planetarias, nebulosas y galaxias, sino que os proporciona las informaciones esenciales para saber, planeta por planeta, astro por astro, qué visitar, qué excursiones proyectar, cómo organizar mejor el crucero sobre la base del propio deseo de aventura.

Así pues, aquí descubriréis cuáles son las mejores metas para escalar las montañas y los volcanes más altos del Sistema Solar, cuáles aquellas para patinar sobre hielo, o para someterse a una cura termal, o asistir a imponentes erupciones volcánicas, o tomar un baño en un océano de metano líquido. Y esto solo si nos centramos en algunos lugares de nuestro sistema planetario. Pero esta guía va mucho más allá, pues llega a explorar nuestra Galaxia, los diversos tipos de estrellas que la pueblan, los planetas extrasolares más extremos, para salir, finalmente, al espacio intergaláctico y visitar otras galaxias, desde las más cercanas hasta las más distantes del universo, en un vértigo extremo.

Si pensáis que tenéis en las manos una nueva *Guía del autoestopista galáctico,* os equivocáis. Lo que habéis empezado a leer no es una novela de ciencia ficción, como las de la saga de Douglas Adams (1952-2001), pero tampoco un libro tradicional de astronomía, ni quiere serlo (¡basta hojear el orden de los capítulos!). Es, más bien, un modo de contar algo de esta espléndida disciplina científica con los ojos de un turista curioso, siempre en busca de nuevas metas, con la voluntad de asombrarse y maravillarse ante las maravillas que el cosmos es capaz de ofrecer. Si buscáis emociones fuertes, seguramente este es vuestro libro.

Ahora bien, no me malinterpretéis: en estas páginas no encontraréis ninguna de las tres «s» —sexo, sangre, sueldo— que, según el periodista alemán Axel Springer (1912-1985), eran los tres pilares sobre los que se sostenía antes el papel impreso. En efecto, según él, un periódico o un semanario que se ocupara preferentemente de escándalos sexuales, de homicidios quizá sin resolver y de maneras de hacer dinero rápidamente o despilfarrarlo en fáciles compras aún más rápidamente estaría siempre destinado a tener un éxito seguro. Aquí las emociones fuertes vienen dadas por otros temas. Lo importante es no sufrir de vértigo, no temer a la soledad y no tener demasiada nostalgia de casa. En verdad, más fácil de decir que de hacer. Pero nadie dijo nunca que ir a la Luna fuese un paseo. Imaginémonos visitar algún planeta enano de la extrema periferia del Sistema Solar, o ponerse en órbita en torno al agujero negro supermasivo que se

encuentra en el centro de nuestra Galaxia, o llegar incluso al centro de un vacío intergaláctico (¡pero no queremos anticipar nada, obviamente!).

Por tanto, mochila a la espalda, tarjeta de embarque preparada, un saludo a nuestros seres queridos que quedan en tierra y a toda prisa, porque acaban de hacer la última llamada para vuestro primer vuelo interestelar.

Sin duda no querréis perderos el viaje con el que lleváis toda la vida soñando. En marcha, entonces. La primera etapa está a la vuelta de la esquina y nosotros os estamos ya esperando con el brindis de bienvenida. ¡Buen viaje y a divertirse!

CAPÍTULO 1

UN PASEO POR LA LUNA

LUNA

SATÉLITE

Distancia media de la Tierra: 384.400 km
Masa: 0,012 veces la masa de la Tierra
Radio medio: 1.738 km
Gravedad superficial: 0,17 veces la de la Tierra
Temperatura mín./máx.: –233/123 °C
Duración de una rotación (en torno al propio eje): 27,32 días terrestres
Duración de una revolución (en torno a la Tierra): 27,32 días terrestres

La Luna es la etapa más cercana de nuestro viaje, pero no por eso la menos fascinante. Para los astroturistas es también la única que permite unas vacaciones relativamente económicas (el mayor coste es el del viaje, que entre ida y vuelta dura cerca de una semana, pero ya hay operadores que ofrecen vuelos *low cost,* a condición de reducir al mínimo el equipaje y aceptar un asiento en la cola del cohete portador). Por otra parte, ¿quién no querría dar un buen paseo por la superficie de nuestro único satélite natural y replicar así las gestas de los doce afortunados astronautas que, entre 1969 y 1972, han podido de verdad caminar por él?

MOONWALK

La experiencia —para quien ha nacido y vivido en la Tierra— es verdaderamente exaltante. Con una gravedad equivalente a un sexto de la de nuestro planeta, podemos dar saltos de récord, a lo alto y a lo largo, y sin necesidad de ningún entrenamiento particular. Al contrario, el riesgo es más bien saltar demasiado alto y no saber aterrizar bien. Por tanto, antes de afrontar el viaje, es preferible

entrenarse no tanto en saltar hacia arriba como en caer desde arriba (y recordad que no hay mullidos colchones esperándoos al término de la caída). Porque, como cantaba el grupo The Police, formado en Londres a finales de los años setenta del siglo pasado, en una canción titulada precisamente *Walking on the Moon,* «I hope my legs don't break, walking on the moon» [«espero no romperme las piernas caminando por la Luna»].

La «ligereza» que se siente en la Luna (donde una persona que en la Tierra pesa 90 kilos repentinamente puede considerarse un peso-pluma, llegando apenas a los 15) hace experimentar una sensación de ebriedad que muchos, una vez puesto un pie en la superficie del satélite, manifiestan bailando, para lo cual recurren a la coreografía hecha célebre por Michael Jackson (1958-2009) en 1983 con la canción *Billie Jean*. ¡No por casualidad esos movimientos son conocidos con el nombre de «moonwalk», es decir, «caminata lunar»! (por cierto, Michael Jackson tituló *Moonwalk* a su autobiografía oficial, publicada en 1988). Ahora bien, el *moonwalk* es un paso de baile muy particular consistente en caminar hacia atrás dando la impresión de moverse hacia delante. Pero en la Luna, si caminamos hacia delante, nos movemos hacia delante, como en cualquier otro sitio del universo. ¡Pensad, de todos modos, qué maravilla probar suerte con el *moonwalk* precisamente en la Luna!

LA ETAPA FUNDAMENTAL

Actividades deportivas, lúdicas o recreativas aparte, ¿cuáles son los lugares que un turista espacial no debe dejar de visitar en la Luna? Los apasionados de las conquistas espaciales no pueden dejar de realizar, de ningún modo, una excursión a la región lunar que fue escenario del alunizaje de la misión *Apolo 11,* la primera que en julio de 1969 llevó a una tripulación humana a pisar otro cuerpo celeste. Para encontrar el sitio exacto, en el rincón sur-occidental de una llanura lávica denominada **Mare Tranquillitatis** (mar de la Tranquilidad), basta configurar el «navegador lunar» y moverse hacia las coordenadas lunares 00°41'15"N, 23°26'00"E. El lugar se llama **Statio Tranquillitatis:** en efecto, este es el nombre oficial atribuido por la Unión Astronómica Internacional (IAU), versión latina de la expresión «Tranquility Base», ideada por Neil Armstrong (1930-2012) y Buzz Aldrin (1930) y anunciada por el primero cuando el módulo lunar *Eagle* tocó tierra con la esa frase que ha pasado a la historia: «Houston, Tranquility Base here. The Eagle has landed» [«Houston, aquí Base de la Tranquilidad. El Eagle ha aterrizado»]. Quién podría renunciar a hacerse un selfi con la bandera estadounidense plantada en la ocasión,

sobre el fondo de un cielo negro como el petróleo a causa de la falta de atmósfera. Paseando por esas áreas, es preciso naturalmente prestar mucha atención para no borrar las huellas dejadas sobre el regolito —la capa de polvo fino que envuelve la superficie lunar— por Neil Armstrong y Buzz Aldrin, que estarán aún allí, bien visibles, precisamente porque ni viento, ni lluvia ni ningún otro agente atmosférico ha podido eliminarlas. Al término de la visita a Statio Tranquillitatis, mirad en torno y pensad en la sensación que debió de experimentar Buzz Aldrin cuando, ante la vista del paisaje lunar, exclamó: «Beautiful, beautiful! Magnificent desolation!» [«¡Bellísimo, bellísimo! ¡Magnífica desolación!»].

OTRAS EXCURSIONES SOBRE LA CARA VISIBLE

Si en vez del mar (es un decir, dado que los mares lunares no son más que enormes coladas de lava basáltica) y de los espacios culturales, amáis la montaña y las excursiones naturalistas, y sobre todo la escalada (porque sin agua no hay nieve, ¡y sin nieve no se esquía!), podéis poner rumbo hacia los **Montes Apenninus,** sí, exacto, los Apeninos (lunares, obviamente: llamados así en honor de los Apeninos, precisamente los que surcan la península itálica), la cadena montañosa más extensa de nuestro satélite. Es aquí donde podéis hallar las montañas más altas de la Luna: una verdadera bendición para todos los alpinistas, si pensáis que se sube con mucho menos esfuerzo. Y luego, además, ni siquiera se plantea el problema de la falta de oxígeno... ¡en el sentido de que no falta solo en las alturas, porque no hay tampoco en la base! A lo largo de los 600 kilómetros de extensión de la cadena, a los escaladores, excursionistas y alpinistas se les plantea el dilema de tener que elegir, pero si realmente queréis poneros a prueba en la empresa, el **monte Huygens** es la opción perfecta: 5.500 metros de altura que escalar de la base a la cumbre. La montaña está dedicada al matemático, físico y astrónomo holandés Christiaan Huygens (1629-1695), que, entre otras cosas, gracias a un telescopio refractor que él mismo construyó, descubrió en 1655 Titán, el principal satélite de Saturno.

Una vez explorados los Apeninos, es momento de visitar algún bonito cráter de impacto, en los que la Luna es extremadamente rica. Entre los más espectaculares, vuestro guía os sugiere el **cráter Copernicus,** uno de los más evidentes y fácilmente reconocibles incluso cuando es observado desde la Tierra, tanto que bastan unos pequeños prismáticos para distinguirlo. El cráter está dedicado al astrónomo y canónigo polaco Nicolás Copérnico (1473-1543), que se hizo famoso en el siglo XVI por defender firmemente un modelo de

universo que situaba al Sol en el centro (modelo heliocéntrico) y rechazar el modelo geocéntrico, según el cual la Tierra se encontraba en el centro. Muy claro y luminoso, en fuerte contraste con los mares que lo rodean, tiene un diámetro de 90 kilómetros, una profundidad de casi 4 kilómetros y se encuentra en la zona oriental del **Oceanus Procellarum** (océano de las Tempestades), el «mar» más extenso de la Luna, de nada menos que 4 millones de kilómetros cuadrados, razón por la cual merece el título de océano. Copernicus es un típico cráter con rayos: los detritos expulsados por el impacto son dispuestos en torno al borde del cráter en una distribución, justamente, radial, como si fueran los rayos que parten del centro del cráter mismo. El desnivel entre el borde circular del cráter y las regiones externas es, en cambio, de «apenas» un kilómetro.

Si después de haber visitado Copernicus aún os encontráis vagando sin rumbo por el interior del Oceanus Procellarum, podréis valorar también la posibilidad de hacer un ligero desvío para alcanzar otro cráter, **Aristarchus,** conocido por ser la zona más brillante de la superficie lunar. El paisaje merece, sin duda, una etapa, pero comprobad que el vehículo lunar que habéis alquilado tenga la autonomía suficiente para llegar. Esta región tiene un poder reflectante (los astrónomos usan el término técnico «albedo») mucho mayor —casi el doble— que el de las otras regiones lunares, y es tan evidente que resulta apreciable a simple vista desde la Tierra. Con un diámetro de unos 40 kilómetros, es significativamente más pequeño que el Copérnico, pero igualmente profundo. Está dedicado al astrónomo griego Aristarco de Samos, que vivió en el siglo iii a. C. y fue el primero en proponer un modelo heliocéntrico del Sistema Solar.

VER LA TIERRA DESDE LA LUNA

La observación de los movimientos lunares muestra que su período de rotación es sincrónico con el período de revolución, que, dicho en palabras más sencillas, aunque menos rigurosas, significa que la Luna realiza una vuelta completa sobre sí misma en el mismo tiempo en que realiza toda una órbita en torno a nuestro planeta. Esto implica que la Luna muestra siempre el mismo hemisferio hacia la Tierra. Hasta aquí os hemos sugerido visitar lugares que están precisamente en la cara de la Luna siempre vuelta hacia la Tierra, por lo cual, además del espectáculo de los mares, los montes y los cráteres, en el cielo, sobre vuestra cabeza, veréis brillar siempre nuestro planeta, parcialmente iluminado por la luz solar, con un bonito color azul. En efecto, como desde la Tierra se ven las fases lunares, conectadas con las recíprocas posiciones asumidas por Sol, Tierra y Luna, desde la Luna se ven

naturalmente las fases terrestres. Por tanto, a menos que os encontréis allí durante la fase de «Tierra llena», una parte más o menos extensa de la superficie terrestre visible desde nuestro satélite estará en sombra.

Fue así, con la Tierra parcialmente en sombra, como la vieron por primera vez los astronautas de la *Apolo 8,* la primera misión que, en diciembre de 1968, llevó a una tripulación humana a circunnavegar la Luna y a encontrarse a casi 400.000 kilómetros de distancia de la Tierra. La emoción de ver el planeta Tierra, iluminado por el Sol, surgir por encima del horizonte lunar en primer plano fue tan grande que el astronauta William Anders (1933) decidió inmortalizar la escena en una fotografía en color que fue titulada *Earthrise (Salida de la Tierra)*. La vista de los océanos, la tierra firme y las nubes desde aquella distancia dejó su huella no solo en la tripulación de la misión. Fue exactamente en la víspera de Navidad de 1968 cuando el hombre —entendido como humanidad— tomó finalmente conciencia de la unicidad y a la vez de la fragilidad del propio planeta. Y esto ocurrió precisamente gracias a esa imagen, espléndida y espantosa a la vez, con la árida y gris superficie de la Luna abajo y la Tierra proyectada contra un cielo negro, sin estrellas, como una nave espacial lanzada al espacio sin ninguna referencia ni posibilidad de orientarse. Considerada una de las fotografías que han cambiado el mundo, el mismo Anders a continuación la comentó con estas palabras: «Hemos hecho todo este camino para explorar la Luna, y lo más importante es que hemos descubierto la Tierra».

AVENTURAS EN LA CARA OCULTA

El hemisferio visible desde la Tierra no agota los lugares que merecen ser visitados cuando uno se encuentra en la Luna. Naturalmente, decidir hacer una o más excursiones por el hemisferio que desde la Tierra está perennemente oculto implica poseer un gran sentido de la aventura (y un presupuesto económico significativamente más alto). El problema principal de la **cara oculta de la Luna** es el de las comunicaciones con nuestro planeta. Al no estar a la vista, es preciso disponer de un radioenlace en el que apoyarse, como, por ejemplo, un satélite en órbita lunar que desde la altura en que se encuentra pueda vernos simultáneamente a nosotros y la Tierra.

Una vez resuelta la cuestión —también para las llamadas de emergencia es aconsejable contar con un puente satelital, pero, a pesar de las recomendaciones de las agencias de viaje interplanetario, siempre hay algún amante del riesgo que se aventura en solitario y sin disponer de radioenlaces—, no hay excusa para perderse la visita al

punto más alto de la superficie lunar, denominado **Selenean summit** (cumbre lunar). A una cota de 10.786 metros sobre la superficie media lunar, supera en casi el 20% la cumbre más alta de la Tierra, el monte Everest, que se detiene en «apenas» 8.848 metros sobre el nivel del mar. Pero, a diferencia del ya citado monte Huygens, que ofrece el aspecto de una verdadera montaña, el punto más alto de la Luna tiene laderas muy suaves, con pendientes de un máximo de 3° respecto de los montes circundantes, ¡por el cual es mucho más sencillo escalar!

Un aspecto curioso de la cara oculta de la Luna, que, no obstante, la hace muy difícil de explorar si no se dispone de medios adecuados para moverse por terrenos muy accidentados, es la casi total ausencia de *maria* (el plural latino de *mare)* y la presencia de cráteres de todas las dimensiones, incluido el gigantesco **cráter meteorítico Apolo** —dedicado al programa *Apolo* de la NASA, la agencia espacial estadounidense—, con un diámetro de 537 kilómetros. Sin embargo, este parece pequeño si lo comparamos con el mayor cráter de impacto de la Luna: la **cuenca del Polo Sur-Aitken,** cuyo increíble diámetro es de aproximadamente 2.500 kilómetros. ¡Imaginad qué «golpe» debió de recibir la Luna para dejarle semejante cicatriz! Pensad que este cráter está entre los más grandes de todo el Sistema Solar. Debe su nombre al hecho de que se halla en las proximidades del polo sur lunar y está delimitado por el cráter Aitken —dedicado al astrónomo estadounidense Robert Grant Aitken (1864-1951), probablemente más célebre por haber dado nombre al cráter que por su carrera profesional— en su extremo septentrional. La cuenca se extiende casi por completo por el hemisferio no observable desde la Tierra, a excepción de su margen meridional, que, por tanto, es visible en el telescopio sobre el borde del disco lunar en las cercanías del polo sur de nuestro satélite.

Hay dos motivos que hacen la cuenca Polo Sur-Aitken muy interesante de visitar, sea para el excursionista dominguero, sea para el experto escalador: el primero es que en su interior se encuentran las más bajas altitudes lunares y, en particular, la mayor depresión, que alcanza los 6 kilómetros bajo el nivel medio de la superficie. El segundo es que en algunas áreas perennemente en sombra alrededor del polo sur existen depósitos de hielo de agua, quizá llevado allí por algún cometa que cruzó la Luna a lo largo de la propia órbita. ¡Y no cualquiera puede visitar un glaciar en la Luna!

BRONCEADO DE TIERRA

Debido a la falta de plantas de iluminación permanentes, es oportuno visitar estos lugares durante el día lunar. Para elegir el mejor

momento, es preciso hacer bien las cuentas, porque en cualquier punto de la superficie lunar el Sol está por encima del horizonte durante unas dos semanas, mientras que en las dos siguientes la oscuridad y el frío reinan soberanos. Pero si os encontráis en el hemisferio visible desde la Tierra y la noche está iluminada por la «Tierra llena», entonces no hay problema: visto desde la Luna, nuestro planeta completamente iluminado por el Sol es más de 30 veces más brillante que la Luna llena, por lo cual el «bronceado de Tierra» está asegurado. ¡Imaginad qué espectáculo debe de ser el paisaje lunar iluminado por la luz azulada proveniente de nuestro planeta! Durante la fase de «Tierra nueva» —por tanto, con la Tierra situada entre el Sol y la Luna— podríais tener también la suerte de asistir a un eclipse total de Sol visto desde la Luna: naturalmente en ese momento os encontraréis en la sombra de la Tierra... porque, visto desde nuestro planeta, el fenómeno aparecerá como un eclipse de Luna.

THE DARK SIDE OF THE MOON

Una última recomendación: antes de afrontar la experiencia de la cara oculta —sin duda, por el fuerte impacto emocional, porque por primera vez en vuestra vida os encontraréis sin ver nuestro planeta y experimentaréis una sensación de profunda soledad—, recordad llevar con vosotros la banda sonora adecuada para haceros compañía, que no puede ser otra que el álbum enteramente dedicado a este hemisferio: *The Dark Side of the Moon* de los Pink Floyd. En este disco, en particular al final del último tema, titulado *Eclipse,* se ofrece una explicación sobre el significado de la expresión «lado oscuro de la Luna». Y quien nos la da no es un componente del célebre grupo británico, sino Gerry O'Driscoll, el portero irlandés del edificio que alojaba los Abbey Road Studios, los estudios de grabación que hicieron famosos los Beatles, cuya voz, inmersa en el latido cardíaco que cierra (y abre) el disco, pronuncia las siguientes palabras: «There is no dark side of the Moon, really. Matter of fact, it's all dark. The only thing that makes it look alight is the Sun» [«En realidad, no hay ningún lado oscuro de la Luna. De hecho, es totalmente oscura. Lo único que la hace parecer luminosa es el Sol»]. En efecto, lo que a veces —erróneamente— se llama «lado oscuro» de la Luna es simplemente el lado oculto a nuestra vista... Lo cual no significa tampoco que esté a oscuras: cuando desde la Tierra no vemos la Luna porque está en la fase de novilunio, el lado oculto está a plena luz, completamente iluminado por el Sol, y es, por tanto, lo contrario de oscuro. Os daréis cuenta en la primera órbita en torno al satélite, antes de que vuestro astrobús empiece las maniobras de alunizaje.

¡Divertíos, pues, y cuidado con volveros lunáticos!

CAPÍTULO 2

LIFE ON MARS?

MARTE

PLANETA

Masa: 0,11 veces la de la Tierra
Radio medio: 3.390 km
Temperatura mín./máx.: –87/-5 °C
Duración del día: 1,03 días terrestres
Duración del año: 1,88 años terrestres
Número de satélites: 2
Posee sistema de anillos planetarios: no

Cualquier momento es bueno para disfrutar de unas vacaciones en la Luna. Basta coger el primer astrobús que parta de la Tierra y en pocos días se llega. Ciertamente no se puede decir lo mismo para Marte. En efecto, mientras que la Luna no se aleja demasiado de nosotros, el «planeta rojo» puede hallarse a tal distancia que el viaje puede resultar muy caro y también más peligroso. Las agencias de astroturismo conocen bien el problema y por eso los «cruceros marcianos» se ofrecen cada dos años o poco más (unos dos años y dos meses, para ser un poco más precisos), cuando los movimientos orbitales combinados de la Tierra y de Marte llevan al planeta rojo a encontrarse en la posición de la órbita más favorable respecto de la Tierra: en oposición al Sol.

ESTAR EN LA OPOSICIÓN

A diferencia de los políticos, para los cuales la oposición es siempre un incordio (para quien está en el gobierno) o muy comprometida (para quien debe hacerla), para los astrónomos —y para los astroturistas— la oposición es la posición en el cielo de un planeta cuando se opone exactamente al Sol respecto de nuestro planeta. En esta particular configuración, el Sol, la Tierra y el planeta están prácticamente alineados, lo que nos ofrece dos ventajas fundamentales: el planeta, visto desde la Tierra, está completamente iluminado por el Sol y,

sobre todo, se encuentra a la menor distancia posible de nosotros. Afrontar el viaje a Marte cuando el planeta se halla en la oposición permite evitar, por tanto, varias decenas de millones de kilómetros de trayecto extra y, en consecuencia, ahorrar en el vuelo. Obviamente, y en contrapartida, la mayor demanda de viajes a Marte precisamente en las proximidades de la oposición del planeta convierte a este período en «temporada altísima», independientemente de la estación terrestre o de la estación marciana en que caiga.

NUNCA HA HABIDO MEDIA ESTACIÓN

Claro, porque también Marte, como la Tierra, tiene sus estaciones. La causa, naturalmente, es la misma: la inclinación del eje de rotación del planeta respecto de su plano orbital (entre otras cosas, los dos valores están muy cerca). Y se hacen también sentir y ver, incluso a quien los observa desde la Tierra con el telescopio: basta mirar las dos manchas blanquísimas visibles en los polos del planeta, mucho más brillantes respecto del resto de la superficie, roja y más oscura (porque refleja menos la luz solar).

Sí, lo habéis entendido: son los casquetes polares de Marte, que, como los terrestres, avanzan o se retraen según las estaciones. Llevan los nombres de **Planum Boreum,** el septentrional, y de **Planum Australe,** el meridional. Pero atención: a diferencia de los terrestres, los casquetes marcianos están constituidos por hielo de agua pero totalmente cubiertos por «hielo seco», o sea, por dióxido de carbono sólido que con el calor del Sol no se disuelve en líquido, sino que pasa directamente al estado gaseoso (de ahí el calificativo de «seco», porque no moja; los físicos llaman a este proceso «sublimación»): propiedad que lo hace útil también en la conservación de helados, que, mantenidos al fresco con el habitual hielo de agua, serían inexorablemente «ahogados» por su disolución. El hielo de agua está mezclado, por tanto, con varias capas de arena depositada con el tiempo por los vientos marcianos, pero durante el invierno marciano se encuentra cubierto por una espesa capa de «hielo seco».

TORMENTAS DE ARENA

Cuando llega el verano en uno de los dos hemisferios, el hielo seco del casquete polar expuesto al Sol se sublima, dejando descubiertas las capas superficiales de hielo de agua. El efecto, visible también desde la Tierra, es una sensible reducción de la extensión del propio casquete. Pero el efecto de la sublimación del hielo seco es también una gran entrada de dióxido de carbono en la tenue atmósfera

marciana.

Estas mutaciones estacionales alteran periódicamente y de manera significativa el clima marciano. En particular, la gran liberación de dióxido de carbono —sobre todo por parte del casquete polar sur, más extenso— condiciona de manera significativa la circulación atmosférica del planeta y la intensidad de los vientos prevalecientes. Uno de los efectos de estas perturbaciones atmosféricas son las grandes tormentas de arena que se observan periódicamente en el planeta rojo —en especial, justo coincidiendo con la primavera y el verano en el hemisferio meridional—, algunas tan intensas y devastadoras que afectan a toda su superficie y se prolongan durante varias semanas.

Por tanto, si bien es cierto que con la llegada de la primavera marciana las temperaturas suben y el clima se hace más cálido, lo es también que es preciso elegir cuidadosamente el período en que aventurarse en los desiertos marcianos porque el riesgo de quedar bloqueados durante días por una tormenta de arena es muy alto. De todos modos, el clima es siempre decididamente frío: por ejemplo, la temperatura en el suelo medida por las sondas *Viking* variaba de unos –30 ˚C en torno a la culminación del Sol (el mediodía marciano) a –86 ˚C antes del alba.

UNA ATMÓSFERA TRANSPARENTE

Si, a pesar de estas premisas, estáis decididos a emprender el viaje a Marte, es bueno que sepáis también qué atmósfera encontraréis (¡en el sentido de los gases y vapores que lo envuelven!). Las tenues capas atmosféricas están compuestas principalmente por dióxido de carbono (al 95%), y el resto es sobre todo nitrógeno, con un porcentaje bajísimo de vapor de agua, pero la presión en el suelo es claramente menor que la terrestre. Puede ocurrir que se formen nubes, pero en general la atmósfera es transparente, a menos que estén en curso las ya citadas y temibles tormentas de arena, levantadas por la superficie del planeta, que está casi completamente recubierta de minerales rojizos, de donde deriva el color de Marte y, en consecuencia, también de su cielo. En cambio, las zonas más oscuras son así simplemente porque reflejan menos la luz solar: a estas regiones el material rojizo ha sido llevado por los vientos, dejando así expuesta la superficie subyacente menos reflectante. Entre otras cosas, precisamente gracias a la transparencia de la atmósfera marciana, ha sido posible estudiar la superficie del planeta incluso con telescopios desde la Tierra. Una situación muy distinta a la de Venus, cuya densa atmósfera nos oculta totalmente de la vista sus características superficiales.

AGUA MARCIANA

Así que acabáis de llegar a la base *Mars-1* —la única, de momento, en condiciones de acoger vuelos interplanetarios— después de un viaje de algunos meses y un período de cuarentena en órbita (fundamental para no llevar a Marte enfermedades infecciosas) y, sin duda, no querréis perder el tiempo. Una rápida visita al hotel para dejar el equipaje y luego..., venga, corriendo a alquilar un todoterreno marciano —preferiblemente con conductor local, porque en Marte es muy fácil perderse— para empezar el *tour* con el que siempre habéis soñado y con la mente en los dos objetivos que todo explorador del planeta desea cumplir cuando llega a Marte: encontrar agua líquida y, sobre todo, hallar alguna forma de vida, en la superficie o en el subsuelo.

En efecto, Marte ha incitado (y estimulado) durante mucho tiempo la fantasía de los hombres, y no solo por su cercanía, sino sobre todo por sus semejanzas (verdaderas o presuntas) con nuestro planeta. Ya hemos hablado de las estaciones, pero hay más cosas: el año marciano dura unos dos años terrestres, el día marciano —llamado «sol»— es un poco más largo que el nuestro (apenas media hora más), su diámetro es la mitad del terrestre y, con toda probabilidad, en un tiempo no muy lejano, la superficie del planeta estuvo surcada por torrentes y ríos de agua. Esa agua que todas las exploraciones marcianas realizadas hasta ahora han buscado frecuentemente en el subsuelo del planeta rojo junto con algún signo de vida, aunque sea fósil. En la actualidad, quien llega a Marte se comporta exactamente como los buscadores de oro en el Lejano Oeste. Solo que aquí, en vez de oro o de cualquier otro metal precioso (¡que también se encontrarían en el planeta si alguien quisiera buscarlos!), se persigue una de las moléculas más comunes del Universo, la molécula del agua, esperando hallarla asociada a material biológico.

PERO ¿LOS MARCIANOS SON BUENOS O MALOS?

En efecto, muchos astroturistas llegan a Marte solo con la idea de ser los primeros en responder a la pregunta que se formulaba David Bowie (1947-2016) en 1971 en la canción *Life on Mars?,* cuando se planteaba si había vida en el planeta rojo. Pero, al menos de momento, todos han vuelto con el rabo entre las piernas. Parece que los marcianos no existen, o, al menos, no tal como fueron imaginados por tanta ciencia ficción a raíz de la «broma» radiofónica —en realidad, una simple pieza de teatro radiofónico que los oyentes se tomaron demasiado en serio— que hizo el joven actor y director

estadounidense Orson Welles (1915-1985) el 30 de octubre de 1938 a partir de un guion basado en el libro de H. G. Wells (1886-1946) *La guerra de los mundos,* publicado en 1898.

A pesar de la increíble cosecha de libros y películas dedicados a los fantasmales habitantes nativos del planeta rojo, no corremos ningún riesgo de invasiones alienígenas por parte de marcianos colonizadores, por suerte, aunque los científicos no excluyen que verdaderamente en la superficie de Marte la vida pueda haberse desarrollado para luego desaparecer (hipótesis pesimista) o retirarse al subsuelo (hipótesis optimista) al variar las condiciones ambientales del planeta. En efecto, hay algunos indicios firmes, pero ningún investigador ha aportado hasta ahora ninguna prueba sólida e irrefutable los respalde.

¿*CANALS* O *CHANNELS*?

Y pensar que fue precisamente un astrónomo italiano, Giovanni Virginio Schiaparelli (1835-1910), con sus observaciones telescópicas de Marte, que inició en la segunda mitad del siglo xix desde el Observatorio de Brera, el primero que dejó volar la fantasía sobre la existencia de hipotéticos habitantes marcianos. En sus dibujos —en esa época no existía aún la fotografía astronómica—, Schiaparelli había trazado unas largas estructuras rectilíneas que conectaban entre sí diversas partes de la superficie del planeta, anotando simplemente que se trataba de «canales marcianos».

En realidad el astrónomo italiano no se había aventurado a hacer afirmaciones no documentables, como la de que los canales pudieran ser artificiales. Pero, por desgracia para él, en la traducción inglesa de aquellas notas el término «canales» se convirtió en *canals,* dando a entender implícitamente que eran artificiales y no naturales (los canales naturales se llaman *channels)*. Fue precisamente este error de traducción el que llevó al astrónomo estadounidense Percival Lowell (1855-1916) a creer que Marte estaba recorrido por agua líquida y poblado por expertos en ingeniería hidráulica en condiciones de construir una densísima red de canales artificiales que debía servir a los habitantes no solo para desplazarse rápidamente de un punto a otro del planeta, sino también para regar las áreas desérticas, exactamente como ocurre en ciertas regiones de la Tierra, acarreando agua de las zonas polares a las áridas y alimentando los acueductos de hipotéticos centros habitados.

Lowell estaba tan convencido de la hipótesis de la civilización alienígena que en el curso de sus observaciones, realizadas desde su Lowell Observatory de Flagstaff, en Arizona, con telescopios más potentes que el empleado por Schiaparelli, no se dio cuenta de que los

canales dibujados por el astrónomo italiano eran una simple ilusión óptica, como quedó demostrado por observaciones posteriores. Pero ya se sabe que el ojo a menudo ve lo que quiere ver, y Lowell fue víctima de sus propias convicciones. Ahora sabemos, por cierto, que los «canales» artificiales no existen, pero los astrónomos no están aún en condiciones de explicar si la superficie marciana fue antaño, en su historia antigua o reciente, rica en agua y, por tanto, recorrida por ríos y bañada por lagos o mares. El hecho es que ahora la superficie del planeta rojo es árida, pero la caza del agua líquida aún no ha terminado.

QUÉ VER EN MARTE

De todos modos, Schiaparelli hizo algo bueno. Durante la oposición marciana de 1877, además de erróneamente afamados «canales», percibió en la superficie del planeta un resplandor blanco brillante al que quiso dar el nombre de **Nix Olympica** (Nieve del Olimpo).

Ahora sabemos que no podía ser nieve, sino, más probablemente, el ya citado «hielo seco», o sea, dióxido de carbono sólido: pero esa cumbre —aunque no nevada— es la cima de la montaña más alta y extendida de todo el Sistema Solar: **Olympus Mons,** el monte Olimpo (llamado así en honor del monte griego considerado en la antigüedad la morada de los dioses), con casi 22 kilómetros de altura respecto del nivel topográfico de referencia y una estructura en escudo de más de 600 kilómetros de diámetro.

Olympus Mons es un volcán no activo con unos números alucinantes: respecto de las llanuras que se encuentran al norte a 1.000 kilómetros de distancia, se yergue con una altitud nada menos que de 26 kilómetros. Las calderas de la cumbre tienen un ancho de 60 por 80 kilómetros y alcanzan más de 3 kilómetros de profundidad, mientras que el precipicio en torno al margen tiene una altura de hasta 8 kilómetros. En resumen, si queréis ver Marte desde arriba, no hay mejor lugar que este. Además, con una gravedad apenas superior a un tercio de la terrestre, se requiere mucho menos esfuerzo para escalar, sin tener en cuenta que las paredes del volcán no son, en absoluto, empinadas (la pendiente máxima es de 5°) y, por tanto, no requieren especiales dotes de escalador.

Durante sus observaciones, Schiaparelli bautizó también muchas otras regiones marcianas, identificadas como áreas oscuras o regiones brillantes. Sus nombres están aún en uso, aunque los límites y las formas de las regiones descritas por Schiaparelli han sido modificados a consecuencia de los datos recogidos por las numerosas sondas espaciales que han visitado el planeta rojo antes de que naciera el

astroturismo de masas. Después de haber visitado el Olimpo, merece la pena bajar al valle para proceder a una exploración de la formación más evidente de Marte: **Syrtis Major Planum,** una región oscura en forma de «V» y llamada así por su vaga semejanza con el golfo de Sirte, en la costa de Libia. Durante mucho tiempo se pensó que era una llanura en depresión, y por este motivo era conocida como Syrtis Major Planitia, pero hoy sabemos que se trata de un gran altiplano, constituido por un volcán en escudo en bajorrelieve. El color oscuro proviene de la roca volcánica basáltica de la región y de la relativa falta de polvo. Gracias a la ya citada transparencia de la atmósfera marciana, esta fue la primera característica superficial documentada de otro planeta: está presente en un dibujo del astrónomo holandés Christiaan Huygens fechado en 1659. Entre otras cosas, el propio Huygens hizo repetidas observaciones de esta «mancha» precisamente con el objetivo de estimar la duración del día marciano.

Más al norte se encuentra una vasta llanura en forma de cuña denominada **Acidalia Planitia.** Y aunque aparentemente carece de cualquier característica relevante, es aquí donde el escritor Andy Weir (1972) decidió hacer «amartizar», en su novela *El hombre de Marte,* la misión *Ares 3,* en que al astronauta protagonista se le da por muerto a causa de una tormenta de arena y, por tanto, se le abandona a su suerte. En esta novela se basa la película *Marte (The Martian),* que permite comprender perfectamente los peligros que corremos si nos sorprende una tormenta en el planeta rojo.

Entre las zonas brillantes más espectaculares —y de visita inexcusable— encontramos **Hellas Planitia,** una región aproximadamente circular que se encuentra al sur de Syrtis Major, en el hemisferio meridional del planeta. Antes se pensaba que era un altiplano cubierto de nieve, pero luego se ha descubierto que, en realidad, se trata de una enorme cuenca de impacto, de una profundidad de más de 7.000 metros, a menudo coronada de nubes, con una extensión de unos 2.300 kilómetros de este a oeste. Con estas características, Hellas es uno de los cráteres de impacto más grandes del Sistema Solar.

Pero si queréis asombraros con la cuenca de impacto más grande de nuestro sistema planetario, debéis dirigiros hacia **Utopia Planitia,** una gran llanura con un diámetro estimado de 3.300 kilómetros. Entre otras cosas, la región es una meta anhelada porque es aquí donde en septiembre de 1976 aterrizó el módulo de la misión *Viking 2,* que, junto con su gemela *Viking 1* (que aterrizó en julio de 1976 en **Chryse Planitia),** fueron las primeras en posarse suavemente sobre el planeta rojo con el fin declarado de buscar posibles formas de vida. Y, por

cierto, aún no hemos dicho por qué Marte es rojo. La respuesta es más fácil de lo que pensáis: ¡es rojo porque está «oxidado»! En efecto, lo que le confiere este color son los óxidos de hierro —la herrumbre, justamente— presentes en las rocas marcianas.

¿Las cuencas de impacto os han aburrido un poco? ¿Queréis ver de nuevo paisajes realmente únicos? Pues entonces Marte es sin duda vuestro planeta. ¿Queréis la prueba? Pues pedidle a vuestro guía que os lleve a la región de **Tharsis,** un vasto altiplano volcánico que alberga los más grandes volcanes en escudo del Sistema Solar (Olympus Mons se encuentra lejos del margen occidental del altiplano). Es aquí donde podréis admirar tres majestuosos volcanes alineados, uno junto a otro: Arsia Mons, Pavonis Mons y Ascraeus Mons, colectivamente llamados **Tharsis Montes.**

Y si después estáis cansados de llanuras, cuencas de impacto y volcanes, ha llegado finalmente el momento de los cañones. Ahora ya estaréis habituados a la idea de que Marte, por pequeño y cercano que sea, es un planeta de récord desde diversos puntos de vista. Y también en lo referente a cañones les gana a todos. Si desde la región de Tharsis os internáis hacia el este, encontraréis pronto un amplio sistema de cañones de más de 3.000 kilómetros de longitud, que se extiende con una anchura de 600 kilómetros y que alcanza una profundidad de 8 kilómetros: son los **Valles Marineris,** en comparación con los cuales el Gran Cañón del Colorado, en Arizona (Estados Unidos) —de 800 kilómetros de largo, 30 kilómetros de ancho y «apenas» 1,8 kilómetros de profundidad—, no puede más que palidecer.

El origen de este vasto sistema de valles, dedicado a la sonda espacial *Mariner 9,* que fue la primera, en 1971, en orbitar alrededor del planeta y descubrió esta estructura, es aún un misterio, aunque la hipótesis más acreditada la ve como una enorme grieta en la corteza marciana formada hace millones y millones de años mientras el planeta se estaba enfriando.

LOS ASTRÓNOMOS DE LAPUTA

Si, paseando por Marte, sentís impulsos de mirar hacia arriba, de tanto en tanto descubriréis que pasan sobre vuestra cabeza dos grandes rocas: son **Fobos** y **Deimos,** los dos satélites del planeta. Ambos son probablemente asteroides capturados, más que auténticos satélites, y, de todos modos, están condenados a estrellarse en el futuro sobre la superficie del planeta en torno al que orbitan.

Su verdadera naturaleza de grandes rocas irregulares bombardeadas por meteoritos no fue confirmada hasta 1971,

precisamente gracias a algunas fotografías tomadas por la sonda *Mariner 9,* pero su descubrimiento se remonta a la célebre oposición de 1877. Quien los identificó fue el astrónomo estadounidense Asaph Hall (1829-1907), gracias a la utilización del que en la época era el telescopio refractor más grande del mundo —con un objetivo de lentes de 66 centímetros de diámetro—, instalado en el United States Naval Observatory de Washington, DC.

Continúa siendo, pues, un misterio lo que llevó al escritor inglés Jonathan Swift (1667-1745), autor de los *Viajes de Gulliver,* a dejar escrito en 1726, o sea, un siglo y medio antes de su descubrimiento, que los astrónomos de Laputa, la isla voladora de los científicos locos, «han descubierto, además, dos astros menores, dos satélites, en órbita en torno a Marte».

A menos que un marciano le hubiese hecho una visita.

CAPÍTULO 3

MERCURIO, EL MUNDO DE HIELO Y DE FUEGO

MERCURIO

PLANETA

Masa: 0,06 veces la masa de la Tierra
Radio medio: 2.440 km
Temperatura mín./máx.: –173/427 °C
Duración del día: 58,65 días terrestres
Duración del año: 87,97 días terrestres
Número de satélites: 0
Posee sistema de anillos planetarios: no

Quién sabe si George Raymond Richard Martin (1948), cuando llamó a su saga *A Song of Ice and Fire (Canción de hielo y fuego),* pensó al menos un momento en Mercurio.

Sí, porque el planeta más interior del Sistema Solar goza de una envidiable propiedad —¡es un decir!—: la de tener, respecto de todos los demás planetas, la mayor amplitud térmica entre el hemisferio diurno, vuelto hacia el cercano Sol, y el nocturno. En efecto, en el primero se alcanzan temperaturas equivalentes a más de 400 °C (700 kelvin). Nada que ver con las pocas decenas de grados de amplitud diurna que se registran en las zonas desérticas del planeta Tierra.

UN LUGAR EN EL SOL

Si sois de los que por nada del mundo renunciarían a una tumbona o una hamaca para tomar el sol, enhorabuena, porque Mercurio es vuestro planeta. En efecto, excluidos los «astrobuses solares» —capaces de acercarse al Sol garantizando todas las protecciones posibles para la tripulación y los pasajeros, pero extremadamente costosos y fuera de presupuesto para la mayoría de los astroturistas—, el planeta es el lugar más cercano al Sol sobre el que podemos posar

nuestros pies. Pero si no queréis tostaros bajo el sol ardiente del día mercuriano —que desde aquí, cuando el planeta se encuentra en su mínima distancia de la estrella, llega a parecer tres veces más grande y once veces más luminoso de como lo vemos desde la Tierra—, debéis recordar poner en la maleta una crema protectora especial, con un factor de protección solar (el llamado *sun protection factor)* elevadísimo, capaz de absorber no solo la radiación ultravioleta sino también —y sobre todo— la X y gamma proveniente de nuestra estrella (la exposición a los rayos X y rayos gamma solares no provoca simples quemaduras: lleva directa y rápidamente a la muerte). En efecto, el problema de Mercurio es la total falta de atmósfera, lo que significa, por tanto, que la radiación solar llega directa a la superficie del planeta sin ningún filtro, como en cambio ocurre, afortunadamente, en la Tierra: por este motivo veréis el disco solar proyectado contra un cielo negrísimo y lleno de estrellas, siempre que no quedéis deslumbrados o incluso cegados en la primera mirada hacia nuestra estrella (por lo que se entiende que es recomendable tener consigo también un buen par de gafas de sol). La hipotética atmósfera, además, tendría la función de mitigar el clima, distribuyendo de manera más equitativa el calor absorbido por el planeta: este es el motivo de las amplitudes térmicas de récord medidas en Mercurio.

UN PLANETA HUIDIZO

Visible a simple vista y, por tanto, conocido desde la antigüedad —los primeros testimonios se remontan al siglo xiv a. C. y fueron recogidos por los asirios—, el planeta más cercano al Sol, recorriendo una órbita interna a la de nuestro planeta, nunca se aparta demasiado de la estrella, lo que permite percibirlo solo como un tenue puntito luminoso inmerso en las luces del alba o el ocaso. Su máxima elongación, es decir, la máxima distancia angular del Sol, vista desde la Tierra, es inferior a 30°. A pesar de las dificultades para percibirlo, dado que está siempre inmerso en la claridad del alba o el ocaso, los astrónomos antiguos fueron capaces de advertir que era un planeta porque se movía muy rápidamente respecto del Sol y las estrellas. Sin embargo, fueron necesarios mil años para que alguien —quizá Pitágoras *(ca.* 570 a. C.-*ca.* 195 a. C.) o, como muy tarde, los astrónomos griegos del siglo iv a. C.— se diera cuenta de que el astro de la mañana y el astro de la tarde en realidad eran el mismo objeto.

El mismo fenómeno se observa también en el planeta Venus, que en la cultura romana, según las apariciones matutinas o vespertinas, era llamado respectivamente «Lucifer», cuando se veía brillar al este antes

del alba, y «Véspero», cuando, en cambio, se veía brillar al oeste después del ocaso.

Precisamente a causa de las dificultades que planteaba su observación, Mercurio fue durante mucho tiempo un planeta poco estudiado. El primero que intentó cartografiar su superficie fue, hacia finales del siglo xix, Giovanni Virginio Schiaparelli (sí, precisamente él, el mismo de los «canales» de Marte). El astrónomo italiano fue también el primero que formuló la hipótesis de que el período de rotación de Mercurio era igual a su período de revolución, apenas inferior a 88 días terrestres.

La obra de cartografía de las características superficiales del planeta fue luego proseguida y ampliada por el astrónomo francés de origen griego Eugène Michel Antoniadi (1870-1944; otro que, dicho sea de paso, sostuvo inicialmente la hipótesis de los «canales» de Marte), que en 1934 publicó los primeros mapas detallados de su superficie.

Sin embargo, hasta la segunda mitad del siglo pasado no ha sido posible obtener conocimientos más profundos sobre la morfología y la estructura interna del planeta, primero gracias a las observaciones desde la Tierra y luego, sobre todo, a las misiones espaciales.

LA RESONANCIA ESPÍN-ÓRBITA

A diferencia de lo que había supuesto inicialmente Schiaparelli, ahora sabemos que el período de rotación de Mercurio no está sincronizado con el de revolución (relación 1:1), sino que los dos están en relación 3:2. En palabras sencillas, significa que el planeta gira sobre sí mismo tres veces cada dos órbitas en torno al Sol. Este fenómeno, según el cual la relación entre el período de rotación y el período de revolución es expresable como una fracción entre números enteros pequeños, recibe el nombre técnico de «resonancia espín-órbita» (con el término «espín» [del inglés *spin*] nos referimos a la rotación de un planeta en torno al propio eje). En particular, por tanto, la de Mercurio es una «resonancia 3:2».

El primero en sugerir este tipo de solución, basándose en las observaciones por radio realizadas en los primeros años sesenta tanto por los astrónomos soviéticos como por los estadounidenses, fue el italiano Giuseppe «Bepi» Colombo (1920-1984), matemático, físico, astrónomo e ingeniero paduano. El estupor de gran parte de la comunidad astronómica, convencida de que la resonancia 1:1 (sincronía entre los dos movimientos, justamente, como se observa para nuestra Luna) era la más probable, fue grande, pero Colombo tenía razón.

Es preciso saber que resonancias orbitales entre varios cuerpos —

por ejemplo, entre algunos satélites de Júpiter— o entre rotación y revolución de un mismo cuerpo —como justamente ocurre para la Luna y Mercurio— no son infrecuentes en el Sistema Solar.

Si os estáis preguntando cómo puede suceder algo semejante, la respuesta está... ¡en la fuerza de la gravedad! En efecto, en el origen de este fenómeno está la fuerza de gravedad que se ejercita recíprocamente entre los astros implicados y, en particular, las fuerzas de marea, que actúan de manera diferencial entre las diversas partes de un mismo astro. Por lo que respecta a Mercurio, por ejemplo, lo que contribuye a la resonancia es la mayor atracción por parte del Sol del hemisferio vuelto hacia la estrella contra la menor atracción sentida por el hemisferio opuesto, más lejano. Esta acción es siempre disipativa y actúa frenando el movimiento de rotación hasta que llega a una solución de equilibrio, como es justamente la de la resonancia 1:1 para la Luna respecto de la Tierra o la de la resonancia 3:2 de Mercurio respecto del Sol.

Pero para vosotros, astroturistas que estáis programando vuestro próximo viaje al planeta Mercurio, ¿todo este razonamiento sobre la resonancia espín-órbita tiene algún interés? Es obvio que sí, pues de lo contrario nos lo habríamos ahorrado. ¡Porque esta peculiar situación tiene grandes —es más, grandísimas— implicaciones en la duración del día y de la noche en el planeta! Pensad: ya el día mercuriano es muy largo de por sí (dura casi dos meses terrestres), pero la combinación con el movimiento de revolución, de duración comparable, hace que entre un alba y la siguiente (o entre un ocaso y el siguiente, obviamente) pasen incluso 176 días terrestres. Por tanto, calculad bien el período en el que viajar, el lugar en que alojaros y, sobre todo, ¡cuántos días queréis estar a plena luz solar! Eso sí, podéis olvidaros del «cambio de armario», porque en Mercurio no hay ni medias estaciones ni estaciones enteras. El eje de rotación del planeta es prácticamente perpendicular al plano orbital, por lo que en Mercurio impera siempre y por doquier la misma estación.

MERCURIO Y LUNA: ¿UNA HISTORIA COMÚN?

A ojos de un explorador inexperto, el aspecto superficial de Mercurio, bien estudiado solo gracias a las exploraciones espaciales centradas en ese objetivo, puede parecer no muy distinto del de la Luna. En efecto, también Mercurio alterna regiones ricas en cráteres con zonas casi llanas, más lisas, que permiten formular la hipótesis de una pasada actividad volcánica, como la que ha dado origen a los «mares» lunares. Por otra parte, también en este planeta la falta de atmósfera es responsable de la ausencia de procesos erosivos, y las características

superficiales pueden conservarse durante millones y millones de años. Pero la superficie de Mercurio muestra unas características originales, únicas en todo el Sistema Solar.

Uno de los principales récords que posee —además del ya citado de la máxima amplitud térmica de un planeta— es el de albergar uno de los mayores cráteres del Sistema Solar si lo medimos en relación con las dimensiones del planeta que lo hospeda: la célebre **cuenca Caloris,** cuyo nombre oficial es **Caloris Planitia,** un cráter de impacto de casi 1.600 kilómetros de diámetro (Mercurio tiene un diámetro inferior a 5.000 kilómetros), sin duda originado por la colisión con un cuerpo rocoso de grandes dimensiones (al menos 100 kilómetros de diámetro), probablemente ocurrida hace unos 3.800 millones de años, época a la que se remontan también los impactos que generaron los mares lunares. El impacto fue tan violento —lo demuestran también las paredes del cráter, elevadas casi dos kilómetros respecto del terreno circundante y que reciben el nombre de **Caloris Montes**— que los efectos se propagaron por todo el planeta.

Si la vasta llanura que conforma la Caloris Planitia puede ser recorrida con relativa tranquilidad incluso con vehículos oruga tradicionales, mucho más compleja es la situación en las antípodas exactas de esta enorme cuenca de impacto. En efecto, aquí se encuentra la zona más «accidentada» de la superficie del planeta, que, por este motivo, ha sido denominada «**terreno caótico**» (o, en inglés, *weird terrain,* «terreno extraño»). Aunque todavía no se ha aclarado el origen de esta región, caracterizada por una serie de colinas irregulares y pequeños cráteres con una conformación distinta de cualquier otra que se observe en el planeta, la hipótesis más acreditada es que fue producida por el encuentro de las ondas sísmicas que se propagaron en el planeta a consecuencia del impacto que produjo la cuenca Caloris, que llegó justamente a partir y levantar el terreno del lado opuesto del planeta.

Otros planetólogos suponen, en cambio, que el «terreno caótico» está constituido por los materiales que volvieron a caer sobre la superficie del planeta una vez que fueron levantados por la colisión. Cualquiera que sea el origen, tened mucho cuidado con vuestro todoterreno, aunque los turistas más audaces estiman que el medio de transporte más adecuado para cruzar esta región es el *quad*. Si después de haber atravesado estos terrenos irregulares, una bendición para los apasionados del *«cross* interplanetario», aún tenéis la espalda en su sitio, os sugerimos volver a dirigiros hacia Caloris Planitia, en cuyo centro hallaréis otra fascinante formación geológica, de nombre aún más fascinante: las **Pantheon Fossae.** Se trata de una serie de

fracturas radiales, largas y sutiles, que parten de un cráter de 40 kilómetros de diámetro que se encuentra casi exactamente en el centro de la cuenca. Sí, habéis entendido bien: el nombre de estas fosas tectónicas hace referencia precisamente al Panteón de Roma, del que recuerdan la estructura en cúpula, en cuyo centro se halla una apertura circular, que en este caso es el cráter denominado **Apollodorus,** en honor del arquitecto griego Apolodoro de Damasco (50/60-130), al que se atribuye el proyecto del Panteón.

Antes de que la Unión Astronómica Internacional diera un nombre oficial a esta estructura superficial de Mercurio, y debido a su aspecto general, el conjunto de las Pantheon Fossae y del cráter Apollodorus, del que parecen irradiar, era denominado **The Spider** (La Araña). Y, en efecto, si sobrevoláis esta área durante el viaje de ida o vuelta, os parecerá ver desde lo alto una enorme araña. Pero mientras que en la araña el cuerpo y las patas nacen seguramente a la vez, en el caso de las Pantheon Fossae y del cráter Apollodorus los astrónomos aún no están seguros. En efecto, todavía no está claro si el origen de Apollodorus ha desencadenado de algún modo la formación de las Pantheon Fossae o si estas, en realidad, ya existían y el cráter se formó a continuación y de manera del todo casual precisamente en las proximidades del centro de esta estructura preexistente.

HONDA O NO HONDA

Para llegar a Mercurio se podría estar tentado de hacer algo bastante loco: lanzarse en dirección al Sol y luego, una vez llegados a las proximidades de la órbita del planeta, hacer un brusco desvío para introducirse en esa trayectoria. Pues bien, si estabais pensando en un viaje semejante, renunciad de inmediato: llegando a grandísima velocidad directos hacia el Sol, el desvío a la altura de la órbita de Mercurio requeriría una cantidad de energía demasiado alta para cualquier nave espacial de turismo ordinaria (ninguna dispone de los motores y depósitos de combustible necesarios para efectuar esta maniobra) y, por tanto, caeríais directamente dentro del Sol sin ninguna posibilidad de recuperación. Un viaje a Mercurio exige, en cambio, competencias de navegación orbital que no están en el bagaje de todos. Antes de partir, aseguraos con el transportista elegido de que el capitán interplanetario que os guiará hacia el planeta tiene el carné de conducir «Bepi» necesario para ejecutar las maniobras de asistencia gravitatoria. Parecerá absurdo, pero el modo más rápido y seguro de alcanzar Mercurio es llegar «de través», como ya han hecho en el pasado varias sondas interplanetarias, entre otras la *Mariner 10,* que, lanzada en 1973 precisamente para explorar el planeta más cercano al

Sol, fue la primera en aprovechar la asistencia gravitatoria de un planeta (Venus) para dirigirse a otro (Mercurio). A propósito, la historia de la astronáutica cuenta que los primeros en aplicar la técnica de la asistencia gravitatoria fueron los soviéticos con la sonda *Luna 3,* que sobrevoló nuestro satélite en 1959 y nos proporcionó las primeras imágenes de su cara oculta.

La idea de aprovechar una oportuna asistencia gravitatoria para llegar a Mercurio y sobrevolarlo varias veces (los técnicos llaman *fly-by* a estos pasos a corta distancia entre una sonda y un planeta o, en cualquier caso, un cuerpo celeste) se le ocurrió precisamente a Giuseppe «Bepi» Colombo —al que ha sido dedicado el «carné de conducir» de capitán interplanetario—, que, a principios de los años setenta, había empezado a colaborar con la NASA como experto en mecánica celeste precisamente para proyectar las trayectorias de algunas importantes misiones espaciales.

Desde aquel momento, la técnica —que aprovecha el llamado «efecto honda»— se convirtió en una práctica habitual, hasta el punto de que fue empleada repetidamente, siempre bajo la dirección de Colombo, para las misiones *Voyager* (en particular, para la *Voyager 2,* que, después del *fly-by* de Júpiter, se dirigió primero hacia Saturno y luego, gracias a sucesivas asistencias gravitatorias, hacia Urano y Neptuno. Sin embargo, Colombo murió antes de ver llegar la sonda a Urano). El efecto honda consiste en aprovechar la gravedad de un planeta durante un paso cercano para acelerar o desacelerar una sonda, lo que significa variar no solo el módulo de la velocidad sino también la trayectoria. Según la posición recíproca de las órbitas y las velocidades relativas, una sonda puede así modificar el propio movimiento orbital sin emplear sus motores y, por tanto, sin consumir combustible, haciendo viables trayectorias y objetivos de otro modo imposibles de alcanzar por razones económicas o de tiempo (como ocurriría en el caso de los planetas exteriores Urano y Neptuno). Queda así explicado el motivo por el cual merece la pena llegar a Mercurio por la puerta de atrás: se tarda un poco más, claro, pero, según el plan de vuelo, se pueden aprovechar los pasos cercanos con Venus y a veces con nuestra misma Tierra para disfrutar de un espectáculo de los que dejan sin aliento. Pero acordaos de llevar las pastillas para el «mal de *fly-by»:* las aceleraciones repentinas y las bruscas frenadas han cosechado no pocas víctimas en los viajes interplanetarios con asistencia gravitatoria.

MERCURIO Y EINSTEIN

Si sois apasionados de la teoría de la relatividad general y no tenéis

dinero suficiente para pagaros un viaje en torno a un agujero negro para experimentar de cerca sus efectos, podéis conformaros, de todos modos, con Mercurio, bautizado así en honor del mensajero de los dioses por la velocidad con que recorre su propia órbita. En efecto, Mercurio era el dios más rápido de todos, capaz de volar de un lugar a otro gracias a sus botas aladas. El planeta contribuyó de modo fundamental a confirmar la teoría propuesta por el físico Albert Einstein (1879-1955): las observaciones muestran que, cada vez que da una vuelta alrededor del Sol, su órbita elíptica rota en el espacio, haciendo avanzar en el tiempo («preceder») el punto de máxima cercanía al Sol (el llamado «perihelio»), de donde procede el nombre de «precesión del perihelio» dado al fenómeno.

Durante la noche de Mercurio —lo que supone tener a vuestra disposición un bonito cielo estrellado, límpido y carente de turbulencias (dada la ausencia de atmósfera)—, no solo podéis disfrutar del espectáculo que ofrecen el planeta Venus y nuestra Tierra brillando en el cielo (si llegáis en el período apropiado, podéis encontrarlos en oposición al Sol y verlos como el segundo y el tercer astros más luminosos del cielo de Mercurio, ¡después del Sol, naturalmente!), sino también probar suerte haciendo vuestras propias mediciones para entender en qué posición de la órbita os encontráis, junto a Mercurio. Si os encontráis en las proximidades del perihelio y disponéis de los datos relativos a los perihelios precedentes, os resultará fácil descubrir que, cálculos en la mano, la teoría de la gravitación universal formulada por el físico inglés Isaac Newton (1642-1726) a finales del siglo xvii no es capaz de explicar enteramente el fenómeno. Bien, digamos que tenéis que ser bastante buenos en mecánica celeste, pero los cálculos no son complicadísimos.

Hacia mediados del siglo xix, y entre aquellos específicamente versados en mecánica celeste, había un matemático y astrónomo francés, Urbain Le Verrier (1811-1877), ya célebre por su contribución al descubrimiento de Neptuno (1846) a partir de la observación de las perturbaciones del movimiento de Urano. Fue precisamente él quien demostró que la gravitación universal de Newton no era suficiente: las mediciones basadas en la observación proporcionaban siempre un valor ligeramente mayor que el calculado sobre el papel. Valiéndose de sus capacidades de cálculo, en 1859 Le Verrier formuló la hipótesis de la existencia de otro planeta, con la órbita interior a la de Mercurio, capaz de perturbar la órbita de este de tal modo que produciría la precesión del perihelio observada.

A este planeta, llamado **Vulcano** por el mismo Le Verrier, se le intentó dar caza durante décadas, pero nadie consiguió nunca

encontrarlo. Porque, sencillamente, no existe. Fue el mismo Albert Einstein quien interrumpió bruscamente los sueños de quienes esperaban el hallazgo de un nuevo planeta en el Sistema Solar al demostrar que su teoría de la relatividad general era capaz de explicar toda la magnitud del desplazamiento observado. Fue así como la precesión del perihelio de Mercurio se convirtió en uno de los primeros bancos de prueba de la nueva teoría de la gravitación de Einstein, superado con éxito como todos los realizados desde aquel momento.

CAPÍTULO 4

LA DIOSA DEL AMOR

VENUS

PLANETA

Masa: 0,82 veces la masa de la Tierra
Radio medio: 6.052 km
Temperatura superficial: 462 °C
Duración del día: 243 días terrestres (rotación retrógrada)
Duración del año: 224,7 días terrestres
Número de satélites: 0
Posee sistema de anillos planetarios: no

Si, después de haber hecho una parada en Mercurio, pensáis que habéis tocado la superficie planetaria más caliente del Sistema Solar, os equivocáis. Sí, porque a pesar de los más de 400 ˚C alcanzados en Mercurio en el hemisferio diurno, expuesto a la luz directa del Sol, el no envidiable récord de planeta más caliente de todos corresponde, en cambio, a Venus. «Es curioso», dan ganas de decir.

En efecto, Venus dista del Sol casi el doble que Mercurio, razón por la que recibe de la estrella casi un cuarto de la radiación que recibe Mercurio, porque, como reza la llamada «ley del inverso del cuadrado», la intensidad de la radiación irradiada por una fuente luminosa es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de la fuente misma. Pero, a despecho de la mayor distancia del Sol, la superficie del planeta que lleva el nombre de la diosa del amor de la mitología romana puede alcanzar casi 500 ˚C, con una temperatura media planetaria en torno a 460 ˚C, y, hecho aún más increíble, no existe amplitud térmica, por lo que todo el planeta se encuentra a la misma temperatura. En la práctica, es un verdadero infierno (y no solo por esto) y, mapas en la mano, parece que no hay realmente manera de resguardarse.

UN AIRE REALMENTE PESADO

En el origen de estas condiciones térmicas absolutamente inhóspitas para cualquier astroturista desprovisto de las necesarias protecciones se encuentran dos causas principales. La primera es la inclinación del eje de rotación del planeta: Venus, a diferencia de la Tierra, cuyo eje de rotación está inclinado unos 23,5° respecto de la perpendicular del plano de la órbita, tiene una inclinación de apenas 3° (en realidad deberíamos escribir de 177°, pero después explicaremos mejor el motivo). Un valor tan bajo implica que en el planeta no existen variaciones estacionales de temperatura, como, en cambio, se observan en la Tierra y en Marte. En la práctica, entre los polos y el ecuador de Venus no hay tanta diferencia de clima.

El otro motivo es la presencia de una densa y espesa atmósfera que envuelve al planeta, aunque quizá podríamos también escribir «se cierne sobre él», dado lo «opresiva» que es. En la superficie venusiana, la presión media es de más de 90 atmósferas, o sea, 90 veces la que medimos en nuestro planeta en condiciones normales a nivel del mar. En la Tierra, para sentir una presión similar, deberíamos sumergirnos en el mar hasta casi un kilómetro de profundidad.

Pero, más allá de la «pesadez», lo que explica por qué el planeta es tan caluroso es, sobre todo, la composición de la atmósfera venusiana, cuyo gas más abundante no es precisamente exótico, sino el muy conocido dióxido de carbono, que constituye más del 95% de la mezcla atmosférica.

Ese mismo dióxido de carbono cuyas emisiones deberíamos reducir aquí en la Tierra para evitar —o, como máximo, ralentizar— la elevación de la temperatura media planetaria, origen de los cambios climáticos que ya estamos observando desde hace tiempo. Sí, porque el dióxido de carbono es uno de los principales «gases de efecto invernadero» presentes en la atmósfera terrestre, donde por «gases de efecto invernadero» se entiende precisamente aquellos capaces de producir el llamado «efecto invernadero», causante tanto de los actuales cambios climáticos terrestres como de la situación atmosférica venusiana.

EFECTO INVERNADERO, ¿QUIÉN ERA ESTE?

Pero ¿qué es el efecto invernadero? ¿Y por qué se llama así? Antes de convertiros en astroturistas, sin duda habréis viajado un poco por el planeta que nos aloja y con toda probabilidad habréis visitado Londres. Una de las etapas inexcusables en un viaje a la capital del Reino Unido, entre una visita al British Museum o a la National Gallery, un cambio de guardia en Buckingham Palace, un repique del Big Ben o un paseo por los puestos de Portobello Road o las tiendas de

Camden Market, son sin duda los Royal Botanic Gardens, Kew (o sea, los jardines botánicos reales de Kew, más conocidos con el nombre de Kew Gardens), que albergan, en su interior, algunos de los más grandes invernaderos del mundo. Uno de estos, el más antiguo, se llama Palm House —Casa de las Palmeras— precisamente porque aloja muchos ejemplares de estas plantas exóticas, típicas de los climas tropicales. Es obvio que el clima de Londres no sería en absoluto adecuado para este tipo de vegetación, pero intentad entrar en la Palm House y os parecerá que estáis inmersos en una verdadera floresta tropical.

El aire del invernadero se calienta porque las paredes de vidrio dejan pasar gran parte de la radiación solar, que se presenta en forma de luz visible, aquella a la que son sensibles nuestros ojos (un porcentaje siempre es reflejado, pero el vidrio tiene una buena transparencia para la luz visible, como es fácil comprobar mirando una ventana), pero retienen la reemitida por las plantas y el terreno en forma de luz infrarroja, menos energética e incapaz de atravesar el vidrio, que la refleja nuevamente hacia el ambiente interior. Por tanto, la radiación infrarroja es captada por la atmósfera presente en el invernadero, que así aumenta la propia temperatura, precisamente porque las moléculas de algunos gases presentes en la atmósfera del invernadero pueden absorberla, aumentando la propia energía y eventualmente reemitiéndola, pero siempre en el interior del invernadero. Entre las moléculas presentes en el aire del invernadero, las que se llevan la parte del león en este mecanismo son precisamente el vapor de agua y el dióxido de carbono. Queda explicada, pues, la expresión «efecto invernadero».

CUANDO EL CLIMA ENLOQUECE

La atmósfera terrestre no está envuelta en inmensas vidrieras, como ocurre en un invernadero, sino que los gases presentes en ella —y, en particular, el vapor de agua y el dióxido de carbono— son suficientes para garantizar la presencia del efecto invernadero en nuestro planeta. En la práctica, son precisamente estos gases los que desempeñan la misma función que los vidrios de un invernadero. Ahora bien, y conviene ser claros en este punto, la presencia del efecto invernadero para la Tierra ha sido y aún es una suerte. Sin este mecanismo de calentamiento, la temperatura media del planeta, que está en torno a los 20 ˚C, rondaría los –20 ˚C.

En resumen, haría de media mucho más frío y las variaciones térmicas serían muy elevadas (pensad solo en la Luna y en Mercurio, ambos carentes de atmósfera). En consecuencia, el problema no es

tanto el efecto invernadero en sí como el riesgo de que este mecanismo de autorregulación de la temperatura atmosférica terrestre pueda descontrolarse, precisamente por nuestra responsabilidad, dado el exceso de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera por actividades de origen antrópico (es decir, humano). En la Tierra es suficiente un porcentaje mucho más bajo de dióxido de carbono en la atmósfera para hacer saltar el mecanismo, y, por desgracia, ya nos estamos dando cuenta.

¿Os gustaría ser testigos de una espléndida experiencia didáctica para comprender cómo podría acabar el clima en un planeta en que el efecto invernadero ha enloquecido? Pues la visita a Venus os irá precisamente como anillo al dedo. Nada de plantas tropicales que mantener al calor, sino una temperatura infernal por doquier justamente a causa del denominado «efecto invernadero incontrolado», de la expresión inglesa *runaway greenhouse effect* (*greenhouse* significa «invernadero», precisamente). En efecto, los planetólogos piensan que también Venus, en su lejano pasado, pudo gozar de un clima más favorable y que su superficie estaría bañada por océanos de agua en estado líquido. Pero, en un momento dado de su historia, a causa de la mayor radiación solar, los océanos se habrían evaporado de modo que en poco tiempo el planeta habría sufrido un efecto invernadero incontrolado que lo habría dejado sumido en las condiciones actuales. Inhabitable, no solo para las plantas tropicales sino también para vuestra posible colección de soldaditos de plomo, ¡considerando que este metal se funde a apenas 327,5 °C! En el caso de Venus, por tanto, la causa del efecto invernadero incontrolado debe imputarse al exceso de vapor de agua emitido a la atmósfera por la evaporación del agua líquida presente en la superficie del planeta.

Después de esta larga digresión sobre el efecto invernadero, el lector atento podría advertir que también en el planeta Marte la atmósfera está esencialmente compuesta por dióxido de carbono pero que allí, sin embargo, hace frío. La respuesta es fácil: la atmósfera marciana es mucho más transparente y mucho menos densa tanto que la terrestre como, con mayor razón, que la venusiana, por lo que retiene menos radiación. Además, Marte está más lejos del Sol, por lo que a su superficie llega mucha menos energía.

Pero, según los planetólogos, debe de haber habido un tiempo, en su lejano pasado, en que el efecto invernadero debió de dejarse sentir intensamente también en el planeta rojo, que, por tanto, debía de ser mucho más cálido que ahora. Fue el período en que la atmósfera de Marte era rica en vapor de agua y la superficie de Marte estaba surcada por ríos y lagos, e incluso por mares y océanos. Que ahora,

como sabemos, solo se encuentran en nuestro planeta.

NUBES TÓXICAS Y LLUVIAS ÁCIDAS

Además de estar caracterizada por temperaturas extremas, la atmósfera de Venus disfruta de otras propiedades que amenazan con hacer la estancia en el planeta bastante compleja, no solo para el astroturista improvisado, sino también para el aventurero experto en ambientes extremos. Ante todo, el viento: si es verdad que los vientos al nivel de la superficie no son especialmente rápidos (los vientos superficiales se mueven a pocos kilómetros por hora), también que el aire venusiano es tan denso que tenemos la impresión, de todos modos, de ser embestidos por una violenta oleada más que por una leve brisa. Por tanto, permanecer de pie no es, ciertamente, una operación sencillísima y, aun lográndolo, se corre siempre el riesgo de ser golpeados por una piedra o, en cualquier caso, por las grandes cantidades de polvo que acarrean estos vientos superficiales.

Y por si fuera poco, llueve. Pero no esa llovizna leve formada por pequeñas gotitas de agua que no causa problemas incluso si nos sorprende sin paraguas. No: en Venus llueve ácido sulfúrico puro. El espeso manto de nubes que envuelve el planeta y que nos impide observar los detalles de la superficie con los telescopios está compuesto, en efecto, por nubes de ácido sulfúrico (obtenido de la mezcla de la escasa agua presente con el dióxido de azufre) que producen frecuentes temporales, a menudo acompañados también de rayos. Lo curioso es que esta lluvia, en realidad, no llega a tocar la superficie, sino que se evapora antes a causa de la alta temperatura para volver a formar nubes de las que nuevamente lloverá ácido sulfúrico, en un ciclo continuo sin interrupciones. Por tanto, y en este sentido, el astroturista podría plantearse prescindir del paraguas, pero es mejor no fiarse demasiado porque, como bien sabemos también aquí, en la Tierra, el ácido sulfúrico es un material extremadamente corrosivo, ¡y no es aconsejable correr el riesgo de «quemarse» la piel bajo la temible lluvia venusiana!

Entre la atmósfera densa y pesada, las lluvias ácidas, los rayos, los vientos y las altas temperaturas, se comprende perfectamente el motivo por el cual las numerosas misiones soviéticas y estadounidenses que han logrado posarse sobre la superficie del planeta han tenido una vida difícil y han sido de breve duración. Y si bien casi todas (salvo las primeras, dado que los proyectistas aún ignoraban el ambiente que habrían encontrado) fueron diseñadas para afrontar presiones altísimas, como los batiscafos, ninguna ha resistido más de algunas decenas de minutos a excepción de la misión soviética

Venera 13, lanzada en 1981, cuyo módulo, desenganchado el 1 de marzo de 1982, sobrevivió durante nada menos que 127 minutos a las inhóspitas condiciones atmosféricas venusianas. Por cierto, además de enviar diversas imágenes del paisaje venusiano, el módulo estaba también dotado de micrófonos cuyo objetivo era registrar el ruido producido por los vientos y deducir, por tanto, su velocidad. Fue la primera vez en que se registró un sonido de otro planeta.

EL DÍA MÁS LARGO... ¡Y EL ALBA AL REVÉS!

En 1959 el periodista irlandés Cornelius Ryan (1920-1974) publicó un largo y documentado ensayo titulado *The longest day,* es decir, «el día más largo». Pocos años después, en 1962, se estrenó una todavía célebre película, basada en el libro, con un reparto lleno de estrellas de Hollywood. En el libro Ryan cuenta las vicisitudes del desembarco aliado en Normandía, la más imponente invasión marítima de la historia, que se inició el martes 6 de junio de 1944, fecha conocida en código como D-Day. Para poner el título a su ensayo, Ryan se inspiró en un comentario del general alemán Erwin Rommel (1891-1944; el célebre «Zorro del desierto») a su ayudante de campo: «las primeras 24 horas de la invasión serán decisivas [...] el destino de Alemania depende del resultado [...] tanto para los Aliados como para Alemania, será el día más largo».

Desde luego ni Ryan ni mucho menos Rommel podían pensar en el planeta Venus, que, no obstante, ostenta el récord de planeta del Sistema Solar con el día más largo. En efecto, al planeta dedicado a la diosa del amor le lleva completar una rotación en torno a su propio eje nada menos que 243 días terrestres, pero este descubrimiento solo fue posible gracias a las observaciones por radar desde la Tierra realizadas en 1963.

Curiosamente, a diferencia de los vientos superficiales, que soplan esencialmente lentos, las nubes altas llegan a alcanzar los 350 kilómetros por hora y completan una vuelta en torno al planeta en unos cuatro días. Esta circunstancia ha hecho muy complicada, durante mucho tiempo, la medición de la velocidad de rotación del planeta, que, añadiendo una extrañeza más, gira en sentido horario (de este a oeste, con un movimiento llamado de «rotación retrógrada») en vez de en sentido antihorario (de oeste a este) como la casi totalidad de los planetas del Sistema Solar, si se observan desde encima de los planos de sus órbitas. El único otro planeta que comparte con Venus esta particularidad es Urano. Los astrónomos denominan a esta característica «rotación retrógrada», y conseguir explicar su origen siempre resulta problemático: en el caso de Venus

se pensó inicialmente en una colisión con un asteroide, pero ahora la hipótesis más acreditada es la que imputa esta condición a los efectos de marea sufridos en el curso del tiempo por el planeta y su atmósfera a causa de la cercanía con el Sol. La rotación retrógrada es también el motivo por el que algunos astrónomos definen el eje de rotación del planeta Venus inclinado en 177° (rotación directa, pero eje invertido) en vez de en 3° (rotación inversa, pero eje directo).

El día venusiano es tan largo que, incluso, dura más que un año venusiano, de apenas 225 días terrestres. Esta combinación de la rotación retrógrada en 243 días y de la revolución en 225 días explica que en Venus entre un alba y la siguiente pasen 117 días. En otras palabras, todo un ciclo día-noche en Venus dura poco más de medio año ($117 \times 2 = 234$, poco más de 225). O, por el contrario, un año venusiano dura poco menos que dos ciclos día-noche. Pero sea día (entendido en la acepción terrestre de «horas de luz») o noche, la atmósfera del planeta no deja pasar mucha luz y difícilmente se consigue percibir el Sol a través de las espesas capas de nubes, lo que crea también en pleno día una permanente condición de semioscuridad (como cuando aquí en la Tierra estamos en pleno día pero nubes negras y amenazantes que anuncian un temporal se ciernen sobre nuestras cabezas).

Y en cualquier caso, si a pesar de todo queréis esperar el alba, recordad mirar hacia el oeste: sí, porque al rotar el planeta al revés, ¡el Sol aparece del lado opuesto respecto del que lo veis surgir en la Tierra!

ENTONCES ¿POR QUÉ DEDICAR EL PLANETA A LA DIOSA DEL AMOR Y DE LA BELLEZA?

En efecto, si habéis leído hasta aquí, podría asaltaros la duda: ¿qué les resultó tan hermoso a los antiguos romanos (y antes de ellos a los griegos) para dedicar el planeta a la más bella y fascinante de las divinidades? Ante todo, conviene advertir que ellos no disponían de muchas de las informaciones que habéis leído en estas páginas. Desde luego, sabían en cuánto tiempo orbitaba en torno al Sol —entre otras cosas, recorriendo una órbita casi perfectamente circular—, pero poco más. Y ese poco más incluía el hecho de que, después del Sol y la Luna, Venus era el astro más brillante del cielo, capaz de resplandecer tanto en la luz del crepúsculo matutino, cuando el Sol, aún por debajo del horizonte oriental, comienza a inundar el cielo con su luminosidad, como en la del crepúsculo vespertino, cuando el Sol, apenas desaparecido detrás del horizonte occidental, inflama aún el

cielo con sus colores.

En efecto, como se ha descrito en las páginas dedicadas a Mercurio, tampoco Venus, en cuanto planeta interior, se aleja demasiado angularmente del Sol (su elongación máxima es de 47°) y, por tanto, limita sus apariciones a pocas horas antes del alba, cuando se encuentra al oeste de nuestra estrella, o a pocas horas después del ocaso, cuando, en cambio, se sitúa al este respecto de nuestra estrella. Ese es el motivo por el que en la antigüedad era llamado **Lucifer** (o «lucero del alba») y **Véspero** (o «lucero de la tarde»). Pero, a diferencia de Mercurio, Venus es extremadamente brillante y fácilmente reconocible en el cielo. Fue, sin duda, este característico brillo —como el de un diamante engarzado en el cielo nocturno— el que impresionó la imaginación de los antiguos observadores del cielo, que por eso decidieron dedicar el astro a la diosa de la belleza. Y lo cierto es que, cuando se mira el cielo a simple vista, nadie puede negar que, excluyendo la Luna, Venus es sin duda el astro más hermoso del firmamento. Ahora sabemos que el mérito de este increíble brillo es de las nubes altas, que reflejan con gran eficiencia la luz solar... ¡aunque la que penetra en la atmósfera es suficiente, de todos modos, para hacer del planeta un infierno!

LOS ANAGRAMAS DE GALILEO

Si sois el tipo de astroturista que antes de emprender un viaje hacia otro cuerpo celeste quiere saber cómo aparece cuando se lo observa desde la Tierra, sin duda habréis puesto alguna vez el ojo en la lente de un telescopio apuntado hacia Venus. Y, por tanto, habréis descubierto que muestra las fases, exactamente como la Luna. Esto ocurre porque, según las posiciones asumidas por Venus respecto del Sol y la Tierra, el planeta puede tener diversos grados de iluminación. Cuando el planeta se encuentra a la mínima distancia de la Tierra (perigeo), sus dimensiones aparentes son máximas, pero es sustancialmente invisible porque está en conjunción inferior, o sea, con el hemisferio vuelto hacia la Tierra completamente en sombras (en la práctica, es lo que ocurre en el novilunio). Cuando, por el contrario, está en conjunción superior, o sea, del lado opuesto del Sol respecto de la Tierra, el hemisferio vuelto hacia nosotros está completamente iluminado por el Sol (fase equivalente al plenilunio), pero las dimensiones aparentes del planeta son pequeñas porque se halla a la distancia máxima de la Tierra (apogeo). En todas las demás posiciones de la órbita se pueden observar las fases falcadas (como la Luna creciente o decreciente), dicótomas (como la Luna en el primer y último cuartos) y gibosas (como la Luna antes y después del

plenilunio).

El primero en observar que el «planeta del amor» mostraba fases como la Luna fue el astrónomo pisano Galileo Galilei (1564-1642), el primero en apuntar un anteojo hacia el cielo. Sabemos de su descubrimiento porque, en una carta fechada el 11 de diciembre de 1610 enviada a Juliano de Médicis (1574-1636) —en la época embajador del Gran Ducado de Toscana ante la corte imperial de Rodolfo II de Habsburgo en Praga (1552-1612)—, Galileo lo anuncia con un anagrama en latín, una estratagema muy en boga en aquellos tiempos, cuando aún las noticias se difundían muy lentamente y el riesgo de que alguien, una vez enterado de un descubrimiento, reivindicase su paternidad era muy alto.

En efecto, el descubrimiento de las fases de Venus era para Galileo fundamental, y tan impactante o quizá más que los que publicó meses antes en su tratado *Sidereus Nuncius*. Sí, porque para él las fases del planeta eran la prueba de que este orbitaba en torno al Sol, tal como sostenía el astrónomo polaco Nicolás Copérnico en su *De revolutionibus orbium coelestium (Sobre las órbitas de los cuerpos celestes),* publicado en 1543.

¿Qué escribió, pues, Galileo, para anunciar el descubrimiento pero mantener la paternidad? El texto de la carta recogía estas palabras, además de la promesa de revelar el significado en el momento oportuno: «Haec immatura a me iam frustra leguntur o.y.», una frase, como poco, misteriosa, traducible por «estas cosas son aún inútilmente demasiado jóvenes para que yo las pueda leer» (excluidas las letras «o.y.», que son obviamente restos de la descomposición de la frase que resuelve el anagrama).

En el intento de resolver el anagrama galileano se puso a prueba incluso Johannes Kepler (1571-1630; sí, el de las leyes sobre el movimiento de los planetas), también él huésped de Rodolfo de Habsburgo en Praga, pero sin suerte. Solo el 1 de enero de 1511, en una nueva carta dirigida a Juliano de Médicis, el científico pisano decidió desvelar el misterio: «Cynthiae figuras aemulatur mater amorum», frase más clara que la anterior, aunque repleta de significados simbólicos. En efecto, la traducción reza: «la Madre de los amores copia las formas de Cintia», que significa que Venus (es decir, la Madre de los amores, *mater amorum)* muestra las fases como la Luna *(Cynthiae figuras;* en la cultura griega Cintia era uno de los nombres usados para referirse a la Luna). ¡He aquí, pues, desvelado el arcano!

VENUS, ¿UN GEMELO DE LA TIERRA?

Permanentemente envuelto por un espeso y denso manto de nubes, Venus fue durante mucho tiempo uno de los objetivos más difíciles de estudiar por parte de los planetólogos, a pesar de que es el planeta más cercano y aparentemente más similar a la Tierra, al menos por lo que respecta a sus características físicas: Venus es solo un poco más pequeño y un poco menos masivo que la Tierra, y tiene una aceleración de gravedad en la superficie equivalente al 88% de la terrestre.

Sin embargo, gracias a las diversas sondas que lo han sobrevolado —incluidas las primeras misiones robotizadas hacia otro planeta, como las soviéticas *Venera* y las estadounidenses *Mariner*— o que se han «inmolado» zambulléndose en la atmósfera venusiana o aterrizando en su superficie y, sobre todo, gracias a las observaciones por radar realizadas en especial por las misiones *Pioneer Venus* y *Magellan* de la NASA y *Venus Express* de la ESA, expresamente dedicadas a la exploración del planeta, ahora sabemos que en el pasado Venus debió de ser mucho más similar a la Tierra de lo que se pensaba y que los dos pueden en cierta medida ser considerados planetas gemelos. Aunque, como ha sostenido un astrónomo, si son gemelos, debieron de ser separados al nacer, a juzgar por las diferencias que presentan en la actualidad.

Las fotografías que las sondas soviéticas *Venera* han enviado desde la superficie no dejan mucho espacio a la imaginación. Un paisaje desolado, constituido por rocas y polvo, cubierto por un cielo oscuro y nebuloso, iluminado a duras penas por la luz solar. Pero la mirada de estas sondas no estaba en condiciones de ir mucho más lejos. Las primeras ideas detalladas sobre el aspecto de la superficie de Venus fueron recogidas por la sonda *Magellan (Magallanes),* que realizó un mapa de radar después de haber entrado en órbita alrededor del planeta. Por estas observaciones sabemos que la superficie carece de grandes cráteres —¡contiene apenas un décimo de la cantidad prevista!)— y está casi completamente cubierta (en un 85%) por rocas volcánicas. La combinación de ambas observaciones sugiere a los astrónomos que en Venus hubo, y quizá aún esté en curso, una intensa actividad volcánica, habida cuenta de que los planetólogos que han estudiado la superficie del planeta han contado más de 1.600 volcanes principales, aunque hay muchos más. La duda de que algunos de ellos están aún activos la suscita el hecho de que nunca se ha observado ninguna explosión, como ocurre con muchos volcanes terrestres —quizá porque Venus carece del vapor de agua que desempeña el papel de «agente explosivo»—, pero los datos recogidos por las misiones espaciales revelan que algunas zonas están aún calientes *(hot spot,*

«puntos calientes») a causa de los llamados «penachos de magma» (que sube hacia la superficie desde las capas más profundas) inmediatamente debajo de la corteza superficial. Precisamente en las proximidades de estas áreas se han observado también coladas lávicas que a juicio de los astrónomos son el resultado de erupciones volcánicas bastante recientes.

Valga todo esto para decir que los apasionados de los volcanes pueden encontrar en Venus sus paisajes ideales incluso deambulando sin rumbo. Antes o después se tropieza sin duda con una bonita lengua de lava, esperemos que no incandescente. El volcán venusiano más importante es el **Ma'at Mons,** llamado así en honor de Ma'at, diosa egipcia de la justicia y la armonía. Hija del dios-sol Ra, que la envió al mundo para alejar para siempre el caos y propagar el orden cósmico, Ma'at era responsable de la disposición de las estrellas en constelaciones. El relieve que se le ha dedicado —que es el volcán más alto del planeta y se eleva más de 8 kilómetros del radio planetario medio— no parece, sin embargo, tan ordenado como el nombre pretendía sugerir: es un enorme volcán en escudo, probablemente aún activo, cuya amplia caldera principal, situada en la cima, tiene un diámetro de más de 30 kilómetros.

El volcán Ma'at no es, en cualquier caso, la montaña más alta de Venus. En efecto, en su punto más alto, los **Maxwell Montes** superan la cima del volcán en nada menos que 3 kilómetros, pues alcanzan los 11 kilómetros más allá del radio medio del planeta. Este macizo es también el lugar más «fresco» de Venus: con una temperatura media de «apenas» 380 °C, es el único punto del planeta en que se puede hallar un mínimo de alivio del calor. ¡Pero siempre bajo una presión de 45 atmósferas!

Los montes Maxwell, dedicados al físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879), que formuló las leyes del electromagnetismo, se ubican en un vasto altiplano basáltico, aproximadamente tan grande como Australia, llamado **Ishtar Terra.** Por su extensión territorial, es considerado uno de los dos «continentes» del planeta. La tierra de Ishtar, dedicada a la diosa del amor (pero también de la guerra) en la mitología de la civilización babilonia, se eleva unos 4 kilómetros sobre el nivel medio del planeta y es rica en áreas volcánicas en las que el astroexcursionista podrá poner a prueba sus capacidades atléticas. El otro gran altiplano es **Aphrodite Terra,** o sea, tierra de Afrodita, que es la divinidad griega del amor, aquella que luego los romanos transformaron justamente en la diosa Venus. Tan extensa como África, también esta «tierra» alcanza unos 4 kilómetros de altitud y presenta muchas de las características geológicas típicas de los paisajes

volcánicos: coladas lávicas, fracturas y fallas, que se entrecruzan en amplias zonas del altiplano.

Pero en Venus podéis encontrar también lo que los planetólogos suponen que pudo haber sido el lecho del «río de lava» más largo del Sistema Solar: **Baltis Vallis,** un canal que actualmente se extiende por 6.800 kilómetros (como el Nilo) pero que en el pasado era sin duda más largo. Con una profundidad media de 100 metros y una anchura que varía de 1 a 3 kilómetros, este sinuoso «valle» lleva el nombre sirio y fenicio del planeta Venus. Llegados a este punto, os quedará claro que prácticamente todas las características superficiales del planeta hacen referencia precisamente a la diosa del amor u otras divinidades femeninas o a nombres dados al planeta por civilizaciones pasadas. La excepción es Maxwell, obviamente, cuyo nombre está adscrito al planeta, a su pesar, solo porque con sus estudios abrió el camino al descubrimiento de las ondas de radio y, por tanto, al uso del radar, cuya tecnología ha permitido quitar los velos de Venus.

¿No hemos hablado de satélites? Es cierto, porque Venus no los tiene. Y, de todos modos, aunque los tuviese, bajo un cielo permanentemente cubierto de nubes, sería realmente difícil advertir la luz nocturna de un hipotético «plenilunio» venusiano.

CAPÍTULO 5

EL GIGANTE Y SU CORTEJO

JÚPITER

PLANETA

Masa: 317,82 veces la masa de la Tierra
Radio medio: 69.911 km
Temperatura efectiva: –148 °C
Duración del día: 9,92 horas
Duración del año: 11,86 años terrestres
Número de satélites: 79 (confirmados)
Posee sistema de anillos planetarios: sí

Si os apasionan las auroras polares, Júpiter es vuestro planeta. Entendámonos: no es que las terrestres sean precisamente desechables, pero las del gigante del Sistema Solar son absolutamente espectaculares. Aunque solo fuera porque son mucho más extensas, brillantes y duraderas que las que se pueden observar desde las regiones polares de nuestro planeta. Cualquier viajero interplanetario que se precie no puede volver a casa sin al menos un vídeo de una aurora joviana.

Por desgracia, el problema es que para asistir a este espectáculo es preciso embarcarse en un viaje largo y, de hecho, también un poco arriesgado. Sí, porque Júpiter, precisamente como la divinidad cuyo nombre lleva (en la mitología romana Júpiter era el dios supremo, señor de todos los demás dioses), es un planeta con características extremas y manifestaciones muy violentas. Desde los vientos hasta las presiones, las temperaturas, el campo magnético y la fuerza de gravedad, todo en Júpiter tiene un nivel de intensidad por suerte desconocido en nuestro planeta pero que, justamente, puede representar una fuente de peligro para el viajero desprevenido. Por tanto, ante todo, es preciso prestar mucha atención a la elección del vuelo y del equipaje que poner en la maleta.

UN LARGO VIAJE

Siempre muy brillante en el cielo, y precisamente por eso fácilmente

distinguible a simple vista, Júpiter es naturalmente conocido desde la antigüedad. En efecto, es el cuarto objeto del cielo en luminosidad después del Sol, la Luna y Venus (aunque en ciertas configuraciones orbitales puede darse el caso de que también Marte pueda llegar a ser más luminoso que Júpiter). No resulta sorprendente, por tanto, que haya sido, después de los cuerpos más cercanos, como la Luna y Marte, uno de los primeros planetas hacia los que hayamos dirigido sondas interplanetarias para la exploración científica, para luego convertirlo en una anhelada meta turística. Muchos sueñan con ella, en efecto, pero pocos se la pueden permitir.

Para empezar, hay que decir que los vuelos *low cost* para el sistema joviano no están particularmente recomendados. En efecto, para ahorrar en combustible, algunas compañías proponen vuelos que emplean incluso muchos años para llegar a Júpiter, a menudo aprovechando el impulso gravitatorio de otros planetas, como Venus y la misma Tierra, antes de dirigirse finalmente al planeta gigante. Por otra parte, los vuelos directos, sin estas «escalas gravitatorias», son en verdad extremadamente costosos y, en cualquier caso, emplean varios meses e incluso llegan a superar un año de viaje. Es cierto que las compañías *low cost* hacen de todo para que el astroturista no se aburra durante el viaje —en particular, los eventuales sobrevuelos de los planetas utilizados como «honda» están entre los ineludibles «valores añadidos» de estos vuelos para viajeros lentos—, pero también lo es que quien decide visitar el sistema joviano quiere llegar allí lo antes posible, porque hay infinitas cosas que ver y que hacer y, de verdad, no hay tiempo que perder.

Pero tampoco conviene olvidar que los astrobuses empleados para los vuelos directos, además de ser más confortables, disponen también de un nivel de protección de la cabina mucho mayor. En efecto, en los primeros y pioneros viajes comerciales hacia Júpiter se han verificado casos de viajeros *low cost* que habían absorbido dosis muy grandes de radiaciones. Esto ocurre tanto durante el largo viaje, por efecto del viento solar y de los rayos cósmicos, como en las proximidades del sistema joviano, precisamente a causa de los fenómenos relacionados con su intenso campo magnético. Esto ha llevado a las compañías a impedir el embarque de pasajeros que no estaban provistos de los oportunos «monos de viaje interplanetario», expresamente diseñados para proteger de las siempre perjudiciales y a veces letales radiaciones ionizantes, como protones y electrones «captados» en el interior de los haces de radiación de Júpiter.

Desde el descubrimiento de los haces de radiación presentes en torno a la Tierra (los cinturones de Van Allen, por el nombre del físico

estadounidense James Van Allen [1914-2006], que los descubrió en 1958), regiones en las que las partículas cargadas provenientes del Sol y del espacio permanecen atrapadas por el campo magnético terrestre, es sabido que puede ser mucho más peligroso permanecer demasiado tiempo en el interior de los cinturones de radiación que envuelven los planetas provistos de campo magnético.

Las partículas de alta energía no solo pueden dañar las sondas espaciales y el instrumental de a bordo, sino que también son extremadamente perjudiciales para los tejidos biológicos, es decir, para cualquier forma de vida. En todo caso, y sin necesidad de ir al espacio, basta con oír algunos testimonios de los accidentes nucleares de Chernóbil y Fukushima para entender el efecto que producen.

UN PLANETA EN COLOR (PERO ¡QUÉ OLOR!)

Según los testimonios de los viajeros que han vuelto de unas vacaciones en torno a Júpiter, su presencia cada vez más amenazante en las ventanillas del astrobús a medida que nos acercamos al planeta es capaz de suscitar fuertes emociones, además de un comprensible temor reverencial, ante un astro en que todo se presenta en versión «maxi». Sus haces de colores dispuestos paralelamente al ecuador son ya reconocibles con un telescopio de aficionado, y las diversas misiones que se han sucedido en pasos cercanos (como las sondas *Pioneer 10* y *11* y las *Voyager 1* y *2)* o introduciéndose en la órbita del planeta (como las misiones *Galileo* y *Juno)* han enviado a la Tierra imágenes de una belleza impactante, ricas en detalles y en colores abigarrados. Imaginémonos, por tanto, el efecto que debe de producir observarlo directamente.

Por las observaciones sabemos que lo que vemos del planeta son las capas superiores de su extensa atmósfera, donde se encuentran nubes de gran altura agitadas por vientos que soplan a centenares de kilómetros por hora, provocados sobre todo por el flujo de calor proveniente del interior del planeta, además del absorbido por el Sol (Júpiter emite más radiación de la que absorbe el Sol). Precisamente como nuestro planeta —piénsese, por ejemplo, en los alisios y los monzones terrestres—, también en Júpiter los vientos predominantes se mueven en direcciones opuestas en franjas adyacentes, confiriendo el aspecto característico de la parte observable del planeta. También contribuye de manera significativa a ese aspecto en franjas contrarrotantes que ofrece el planeta su notable velocidad de rotación: un «día joviano» dura apenas 10 horas (¡es el día más breve de los planetas del Sistema Solar!). Júpiter completa, por tanto, una rotación sobre sí mismo en menos de la mitad del tiempo empleado por nuestro

planeta: ¡nos encontramos frente a una peonza gigante y velocísima!

Según la nomenclatura en uso desde hace tiempo, a las franjas claras se les ha atribuido el nombre de **zonas,** mientras que las oscuras son denominadas **bandas.** Así, por ejemplo, en el mapa de Júpiter hallamos la zona ecuatorial, constituida por una amplia franja clara que envuelve todo el planeta en torno al ecuador, y las bandas templadas (septentrional y meridional), franjas más estrechas respecto de la zona ecuatorial y que envuelven al planeta en las latitudes medias norte y sur. Solo en los dos polos encontramos las llamadas **regiones:** la región polar septentrional y la región polar meridional. Las variadas coloraciones se deben a una serie de factores, como leves diferencias en la composición química, cambios de temperatura y distintas profundidades. En concreto, sabemos que las bandas más oscuras están constituidas por aire a baja presión más caliente, en movimiento descendente, mientras que las zonas más claras están constituidas por aire en alta presión más frío en movimiento ascendente.

A pesar de que la atmósfera del planeta —es más, prácticamente todo el planeta— esté constituida esencialmente por hidrógeno y helio, en el espectacular abigarramiento de colores desempeñan un papel importante algunos compuestos de azufre (¡presente en trazas en la atmósfera joviana pero capaz de contribuir notablemente a la estética del planeta!), que participan en la coloración parda, y el amoníaco, cuyos cristales conforman las nubes blanquecinas. A más altura encontramos, luego, las nubes rojizas. Bajando a las profundidades, nos topamos primero con las de coloración marrón, luego con las blancas y por último con las más profundas, que pueden verse de vez en cuando a través de los espacios que dejan libres las nubes subyacentes y que son de color azulado.

Vistas aún desde más cerca, estas nubes muestran infinitos detalles, con vórtices de varias dimensiones que se entrecruzan y superponen cuando zonas y bandas entran en contacto. Comprendéis perfectamente que, pese a que esta visión pueda dejarnos extasiados, la experiencia olfativa será menos agradable, siempre que tengáis la voluntad y sobre todo el valor de afrontarla. Lamento decirlo, pero gracias a la contribución del azufre, el olor de Júpiter es verdaderamente desagradable. Un olor en comparación con el cual las solfataras de los Campos Flégreos son perfumadas.

UN OCÉANO DE HIDRÓGENO... ¡METÁLICO!

Hasta aquí hemos hablado de nubes, vientos y atmósferas, pero de ninguna corteza sólida sobre la que una nave pueda posarse

suavemente. En efecto, lo hemos dado por descontado, pero quizá sea bueno especificarlo: en Júpiter no hay manera de aterrizar. De esas hermosas y ásperas cortezas rocosas a las que nos habían habituado planetas como Mercurio, Venus y Marte (además de la Tierra, naturalmente), precisamente por eso llamados planetas «rocosos» o «terrestres», en los planetas gaseosos como Júpiter no hay ni rastro. Quizá, muy en las profundidades, en el centro del planeta, se encuentre un núcleo sólido compuesto por hierro y silicatos, pero sin duda imposible de alcanzar por cualquier sonda, incluso robotizada. Las temperaturas y las presiones allí abajo son de tal magnitud que destruyen cualquier manufactura. Y son precisamente las temperaturas y las presiones distribuidas en las diversas capas del planeta las que le confieren una estructura interna que tiene algo de increíble. Obviamente no podemos verla directamente: solo podemos suponerla y describirla a través de modelos matemáticos, a partir de los datos observados, o sea, de las características observables y mensurables del planeta.

En efecto, los planetólogos se han hecho la idea de que debajo del espeso manto de nubes agitadas por los vientos se pueden encontrar algunas capas de aspecto un poco particular. Envolviendo un posible núcleo rocoso, en cualquier caso muy pequeño y compuesto por hierro y silicatos, debería hallarse un profundo océano de **hidrógeno metálico líquido,** ¡un material inexistente de forma natural en la Tierra y también extremadamente difícil de reproducir en laboratorio! Sí, habéis leído bien: hidrógeno no en estado gaseoso, como estamos habituados a encontrarlo aquí en la Tierra, sino en una condición extremadamente particular, producida precisamente por las altísimas presiones a las que está sometido. No tengáis miedo, también vosotros conocéis sin duda un metal líquido: el mercurio es un metal que a temperatura ambiente se encuentra en estado líquido.

Sobre esta capa, entre las capas atmosféricas y el océano de hidrógeno metálico, debería haber otro océano, de aspecto un poco más banal, se podría decir, al estar compuesto esencialmente de hidrógeno líquido «normal», siempre a causa de las altas presiones en el interior del planeta. Por desgracia, al no poder ir a verlo directamente, no sabemos si entre estas dos capas de hidrógeno, el sencillamente líquido y el metálico, existe una transición nítida, una superficie de interfaz entre uno y otro.

Sirva todo esto para deciros que, incluso en el caso de que consiguierais equiparos para «sumergiros» en el planeta, podríais descender a profundidades cada vez más extremas sin encontrar una verdadera superficie no solo donde apoyar los pies sino solo que os

permitiera decir: «¡Finalmente estoy nadando en el hidrógeno metálico!», porque si bien es cierto que antes o después llegaríais, probablemente sería de manera gradual, como si estuvierais sumergidos en un líquido cada vez más denso, y no con una transición nítida, como ocurre, por ejemplo, cuando nos zambullimos en el mar y pasamos de manera brusca del aire al agua.

UN TIPO REALMENTE «MAGNÉTICO»

Júpiter es «súper» en todo. En el Sistema Solar no tiene igual. No es solo el planeta de mayor dimensión y con una masa de dos veces y media la de todos los demás planetas juntos, sino que también tiene un campo magnético extremadamente intenso: ¡más de 10 veces el terrestre! Con toda probabilidad lo genera precisamente la rotación de ese profundo océano de hidrógeno metálico que envuelve el núcleo del planeta, y su intensidad puede representar un cierto problema para los pilotos del astrobús, porque el riesgo es, literalmente, ¡el de perder la brújula!

Naturalmente, un campo magnético tan intenso tiene el efecto de proteger el planeta del viento solar, el continuo flujo de partículas cargadas procedente del Sol (si lo consigue el terrestre, ¡imaginémonos el joviano, capaz de crear un escudo de protección —la magnetosfera— mucho más extenso y resistente!). Pero también tiene la capacidad de producir fenómenos aurorales increíblemente grandiosos, con la complicidad también de las cuatro lunas de Júpiter, cuyas órbitas se encuentran todas internamente a esta región protegida y que contribuyen, interactuando con el campo magnético que atraviesan, a hacer de las auroras polares jovianas un espectáculo realmente único. En particular, el satélite Ío, caracterizado por una intensa actividad volcánica, contribuye a alimentar constantemente los fenómenos aurorales con la emisión continua de materiales erupcionados, que luego van a encauzarse a lo largo de las líneas del campo magnético del planeta. Es más, Ío es precisamente la principal fuente de material de la que se nutre la magnetosfera joviana y, por tanto, contribuye de manera significativa a la producción de auroras polares. Y de hecho se puede decir que existen las auroras producidas por Ío (y por los otros satélites mayores).

A LA CAZA DE AURORAS POLARES JOVIANAS (PERO TAMBIÉN TERRESTRES)

Desgraciadamente, por muy extensas, brillantes y duraderas que sean, las **auroras polares jovianas** no son observables desde nuestro planeta. Y esto explica por qué los cazadores de auroras están

dispuestos a todo con tal de obtener un billete para viajar a Júpiter. Quien ha presenciado una aurora polar terrestre sabe perfectamente que, como los eclipses totales de Sol, también las auroras crean dependencia (un poco como las drogas, en realidad, aunque por suerte son menos perjudiciales y se puede abusar de ellas a gusto... ¡entendámonos, de eclipses y auroras!). Cuando has visto una, en seguida quieres ver otra, y otra más, y no existe nada que pueda sustituir ni por asomo a esa experiencia.

Las auroras polares —las boreales, en particular— son un fenómeno conocido desde la antigüedad, aunque la comprensión de su mecanismo de funcionamiento es bastante reciente. Su explicación, que se remonta a principios del siglo xx, se debe al físico noruego Kristian Birkeland (1867-1917), que pasó muchos años de su vida estudiando precisamente las auroras boreales. Gracias a una serie de experimentos, Birkeland, evidentemente maravillado por este fenómeno, llegó a entender que en su origen debía de estar la interacción entre las partículas emitidas por el Sol y el campo magnético de nuestro planeta. ¡Y tenía razón!

Y es que el Sol no aporta a nuestro planeta solo luz y calor. La estrella Sol interactúa con la Tierra de muchas otras maneras, y en especial precisamente a través del ya citado viento solar, un flujo de partículas cargadas (protones y electrones) que son continuamente emitidas por el Sol y que en su camino a través del espacio interplanetario pueden encontrar también otros planetas, alterando su posible campo magnético y a veces penetrando en sus atmósferas. Ahora bien, el campo magnético terrestre funciona precisamente como escudo protector frente a estas partículas, la mayor parte de las cuales es desviada a lo largo del borde externo de la magnetosfera, mientras que las más energéticas y directas, una fracción pequeña del flujo total, por suerte, consiguen penetrar en el interior de esta verdadera armadura magnética. Entre estas, solo una fracción aún más pequeña logra introducirse en la atmósfera directamente desde las «aberturas» que corresponden a los polos magnéticos (el talón de Aquiles no solo de la magnetosfera terrestre, sino de todas las magnetosferas, también de la joviana) y, después de haber sido aceleradas precisamente por el campo magnético, consiguen adquirir la energía necesaria para dar vida al fenómeno auroral, remolineando a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético terrestre en dirección a los dos polos. Es aquí donde, finalmente, producen las auroras polares, gracias a la interacción con los átomos y las moléculas que componen las capas altas de la atmósfera.

Las bandas (o paños), como se llaman las características apariencias

de las auroras boreales, en forma de cortinas o drapeados luminosos y coloreados, a veces inactivos, otras veces móviles, están constituidas precisamente por la luz emitida por las moléculas atmosféricas excitadas por los choques con las partículas del viento solar, y cada especie atómica o molecular produce luz de una coloración específica.

Como todo cazador de auroras terrestres sabe perfectamente, en nuestro planeta las auroras boreales se manifiestan principalmente en la franja geográfica situada encima del Círculo Polar Ártico, o sea, en latitudes altas (análogamente, las australes son visibles al sur del Círculo Polar Antártico). La zona de visibilidad, centrada en los dos polos magnéticos, tiene una forma vagamente circular y se llama «óvalo auroral». Consideraciones similares son aplicables también a Júpiter, naturalmente, salvo que sus óvalos aurorales, obviamente centrados en los respectivos polos magnéticos, son diez veces más extensos que los terrestres. Habida cuenta de las distintas características físicas y la diversa composición química de la atmósfera joviana respecto de la terrestre, los fenómenos aurorales son completamente diferentes de aquellos a los que es posible asistir en la Tierra. Y por esta razón cualquier apasionado en auroras que se precie debe tener planeado viajar a Júpiter al menos una vez en la vida.

LA TORMENTA PERFECTA

Tanto las observaciones desde la Tierra como, con mayor razón, las misiones que han estudiado el planeta desde cerca han evidenciado que la atmósfera de Júpiter es muy dinámica y en continua evolución: se pueden verificar temporales de una violencia increíble, con rayos y granizo... de cristales de amoníaco (que, mezclado con hielo de agua, forma unos granos que los científicos han llamado *mushballs,* por el nombre de las pelotas usadas para una variante del *softball,* más grandes y más blandas que las empleadas en el béisbol).

Por otra parte, la rápida rotación del planeta y la consiguiente formación de fuertes vientos e intensas corrientes atmosféricas producen una increíble cantidad de vórtices, o sea, de estructuras circulares rodantes, precisamente como los ciclones (áreas de baja presión) y los anticiclones (áreas de alta presión) que se observan en la atmósfera terrestre. Pero, dadas la extensión y las características físicas de la atmósfera joviana, estos vórtices tienen dimensiones que pueden alcanzar incluso algunos miles de kilómetros y durar algunos años.

Sin embargo, entre estos, hay uno que destaca especialmente: se trata de la **Gran Mancha Roja** (llamada coloquialmente «GRM» entre los aficionados), que, como sugiere el nombre, es una extensa

formación de color rojizo que parece una mancha superpuesta a la estructura en zonas y bandas descritas con anterioridad. La GRM (o GRS, *Great Red Spot,* por su denominación en inglés) es tan extensa y de color tan llamativamente diferente respecto del fondo que es muy fácil observarla incluso con un pequeño telescopio de aficionado. En efecto, sus medidas son de récord: tiene un aspecto oval —el eje mayor es paralelo a las franjas atmosféricas— con una superficie variable que ha llegado a extenderse hasta contener tres veces la superficie de la Tierra, aunque en los últimos años parece que se está reduciendo lentamente, hasta el punto de que recientemente mostraba una superficie «apenas» comparable con la de nuestro planeta. En todo caso, sí, lo habéis entendido perfectamente: lo que estáis viendo desde la ventanilla del astrobús es el mayor vórtice existente en el Sistema Solar, un espectáculo que absolutamente nadie debería perderse, no solo los apasionados en meteorología planetaria.

Así que cuando reservéis el viaje, prestad atención y pedid explícitamente sobrevolar de cerca la Gran Mancha Roja, ¡porque no todas las compañías de astroturismo lo incluyen en el paquete básico! De hecho algunas contemplan sobrevolar la GRM como una excursión aparte, como las visitas a los distintos satélites, y cobran un precio extra según la altura de sobrevuelo, a pesar de las reiteradas protestas de las asociaciones en defensa de los consumidores. Para disfrutar plenamente de esta maravilla es preciso descender al menos por debajo de los 10.000 kilómetros de altura, como hizo la sonda de la NASA *Juno* en julio de 2017. No es casual que las fotos más espectaculares de la GRM que tapizan los laterales de los astrobuses interplanetarios hayan sido todas tomadas por *Juno*. De momento, en cualquier caso, se mantiene la total liberalización de los precios en los viajes más allá del cinturón principal de asteroides.

Localizada en el hemisferio meridional del planeta, la GRM es una zona de alta presión, situada a altura más elevada y a temperatura mucho más fría que las de las zonas circundantes, y que gira en sentido antihorario con un período de unos seis días. La majestuosidad de este enorme anticiclón se vuelve aún más increíble si se piensa que existe desde hace al menos tres siglos y medio. Pues el primero en señalar su presencia fue el astrónomo italiano Giovanni Domenico Cassini (1625-1712), que la observó en 1665. Desde aquel momento, aun cambiando de dimensiones y a veces también de color (¡en ciertos momentos había empalidecido tanto que parecía anunciar su inminente desaparición!), esta tormenta está siempre ahí, tan imponente que apabulla incluso al meteorólogo más experto, que no podrá dejar de preguntarse cómo es posible que un vórtice de este tipo

resista tanto tiempo.

Ahora bien, en cierta medida, estamos en condiciones de ofrecer una explicación sencilla. Y es que los astrónomos suponen que la increíble estabilidad temporal de este ciclón se debe a la relativa homogeneidad del ambiente subyacente, que carece de obstáculos, como son, en cambio, los continentes o, en cualquier caso, la tierra firme en nuestro planeta, capaces, por ejemplo, de provocar el rápido agotamiento de los huracanes tropicales. Algunos investigadores han llegado incluso a pensar que esta estructura, que parece esencialmente independiente del resto de la atmósfera joviana, es permanente, aunque otros, en cambio, sostienen que puede llegar a agotarse, aunque ninguno, por desgracia, sabe desde cuándo existe. Tampoco se sabe a qué obedece su color tan característico, ni de qué dependen las variaciones cromáticas que periódicamente se observan, aunque es probable que color y variaciones se deban a reacciones químicas en que participan elementos como azufre y fósforo, además de moléculas de hidrocarburos.

Pero entre tantos misterios aún sin resolver sobre la GRM, hay uno en particular que mantiene a los científicos devanándose los sesos: ¿qué alimenta esta tormenta, caracterizada por vientos que superan incluso los 600 kilómetros por hora? Porque en la Tierra lo que proporciona energía a los huracanes es el calor de los océanos subyacentes, pero en Júpiter no existe un mecanismo análogo. Se entiende que a algo contribuye, por supuesto, el calor transportado por el material en subida, procedente de las capas más bajas, pero parte de la energía que necesita esta tormenta para mantenerse en rotación la proporcionan, sin duda, los otros innumerables vórtices que, encontrándose de paso en el entorno cercano de la GRM, son literalmente «fagocitados» en su interior: una escena que se repite continuamente y que muestra la potencia de esta verdadera «tormenta perfecta».

GALILEO, EL ANTEOJO Y UN ADMIRABLE DESCUBRIMIENTO

En el otoño de 1609, Galileo Galilei, desde el jardín de su vivienda en los alrededores de la Universidad de Padua, donde ostentaba un prestigioso cargo como «doctor en matemáticas», empieza a apuntar el anteojo, de construcción propia, hacia la bóveda celeste. Se puede afirmar, sin riesgo a ser desmentido, que la astronomía moderna nace en aquellas noches que Galileo pasa, expuesto al frío, apuntando metódicamente todas las observaciones y disfrutando de un cielo oscuro y límpido, exento de la contaminación lumínica que ahora sufren nuestras ciudades. El científico pisano se percata de inmediato

de que el universo que ve a través de las lentes de ese instrumento es muy distinto del conocido hasta entonces. Pero hay un descubrimiento en concreto que lo perturba más que ningún otro. Es él mismo el que escribe que este «supera, con mucho, cualquier imaginación», y tiene toda la razón. En efecto: en torno a Júpiter orbitan «cuatro estrellas errantes» que cada noche cambian de posición respecto del planeta sin alejarse, no obstante, de él. De inmediato Galileo piensa que se trata de un sistema solar en miniatura, con Júpiter en el centro y cuatro satélites en órbita alrededor de él. Lástima que esta hipótesis choque con el modelo geocéntrico del universo propuesto por Aristóteles y perfeccionado por el astrónomo alejandrino Claudio Tolomeo (100-170 *ca.),* según el cual la Tierra está en el centro del universo y todos los astros se mueven en torno a ella. Pocos años antes, precisamente por haber criticado el modelo geocéntrico, el filósofo Giordano Bruno (1548-1600) había sido condenado como hereje y quemado vivo en la plaza del Campo de' Fiori, en Roma, hoy sede de un animado mercado y en aquella época lugar elegido por el Tribunal de la Inquisición como sede de las ejecuciones capitales.

Pero el descubrimiento es demasiado importante para mantenerlo oculto. La observación de cuerpos que no orbitan en torno a la Tierra, sino en torno a otro cuerpo celeste, es un importante apoyo en favor de la teoría heliocéntrica propuesta por Copérnico, según el cual en el centro del Universo no se encuentra nuestro planeta, sino el Sol. De modo que Galileo toma la decisión de hacerlo público, junto con otros extraordinarios descubrimientos astronómicos realizados entre finales de 1609 y enero de 1610 con sus observaciones con el anteojo, como el de que la Luna no es una esfera perfecta, sino que está salpicada de cráteres y montañas. El 12 de marzo de 1610 se publica en Venecia en 550 ejemplares el *Sidereus Nuncius,* el «nuncio sidéreo» (traducible también por «mensajero celeste»), con dedicatoria impresa a Cosme II de Médicis (1590-1621), gran duque de Toscana, al que Galileo dedica los cuatro satélites de Júpiter al denominarlos **estrellas mediceas** (que nosotros, ahora, en su honor, llamamos **satélites galileanos).** El libro, escrito en latín, no tiene muchas páginas, y muestra grabadas las figuras de los esquemas, dibujos y (espléndidas) acuarelas hechas por Galileo durante sus observaciones, hasta el punto de que el texto es considerado modernamente no solo una obra científica, sino también artística. Pero es, sobre todo, por su contribución al avance del conocimiento científico por lo que el *Sidereus Nuncius* forma parte justamente del restringido catálogo de los libros más influyentes de la historia de la humanidad.

Ío, Europa, Ganimedes y **Calisto:** estos son los nombres de los cuatro satélites que estaban detrás del admirable descubrimiento de Galileo (a los que en realidad en sus dibujos adscribió respectivamente los números romanos I, II, III y IV). El gran duque, que antes de subir al trono de Toscana había sido discípulo de Galileo, quedó tan impresionado con el descubrimiento —y con la dedicatoria— que atrajo de inmediato al científico pisano a su corte de Florencia y le otorgó el título de «primer matemático» del Estudio de Pisa y del mismo gran duque. Pero el prestigio y la gloria eran ya tales y tantos —a pesar de la presencia de grandes opositores, naturalmente— que Galileo podía permitirse pedir cualquier cosa al gran duque, como recibir el título de «filósofo gran ducal», no tener la obligación de enseñar y dedicarse únicamente a las investigaciones de su propio interés. Concesiones todas que Cosme II aceptó sin pestañear, además de garantizar al científico un salario espléndido. La Historia nos cuenta que a Galileo no le fue mal, como a Giordano Bruno, pero tampoco muy bien, pues fue procesado y obligado a vivir los últimos años de su vida en «arresto domiciliario» en una villa, llamada «La Joya», en la colina de Arcetri, al sur de Florencia, la misma colina que siglos después fue elegida para alojar el homónimo observatorio astrofísico. Si se da el caso de que, de regreso de vuestro viaje interplanetario, hacéis una parada en Florencia, vuestro guía se permite sugeriros también una visita a la última morada de Galileo.

Pero volvamos a los cuatro satélites galileanos, que serán, como habréis intuido, meta obligatoria de otras tantas excursiones. Su danza en torno al gigante gaseoso ofrece un espectáculo espléndido observable incluso desde la Tierra: los cuatro satélites son fácilmente visibles con pequeños instrumentos, como demuestra justamente el descubrimiento hecho por Galileo, y verlos cambiar de posición recíprocamente y respecto del planeta de noche en noche hace comprensibles, sin mucho esfuerzo, sus movimientos orbitales. Ío, el más cercano al planeta (dista unos 400.000 kilómetros de él, como la Luna de la Tierra), emplea menos de dos días en completar una revolución, mientras que Calisto, el más distante de los cuatro (orbita a aproximadamente un 1.900.000 kilómetros de distancia del planeta), tarda casi 17 días. En medio, Europa y Ganimedes, que emplean más de 3,5 días y poco más de una semana, respectivamente. Además, estos movimientos inspiraron también la primera medición de la que ahora sabemos que es una constante fundamental de la naturaleza: la velocidad de la luz.

TIEMPOS DE REACCIÓN

El primero en proponer un método para medir la velocidad de la luz fue precisamente Galileo, que lo introdujo en la forma «divulgativa» del diálogo, grata a tantos escritores, en su obra *Discursos y demostraciones matemáticas en torno a dos nuevas ciencias referidas a la mecánica y los movimientos locales,* publicada en Leyden (Países Bajos) en 1638. En esta obra Galileo retoma los personajes ya introducidos en el célebre *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo,* publicado en 1632, en lengua italiana, con el objetivo de ampliar su público y no limitarse solo a los académicos, como había hecho con el *Sidereus Nuncius*. El diálogo discute y compara el sistema tolemaico, geocéntrico, con el copernicano, heliocéntrico, evidenciando en particular las graves deficiencias del primero y los grandes méritos del segundo. Los personajes que conversan son tres señores venecianos aficionados a la ciencia y representantes de diferentes puntos de vista: Salviati, por boca del cual Galileo expone su modo de entender las cosas; Simplicio, el representante de la ciencia «oficial» de entonces, es decir, la aristotélica, y Sagredo, un inteligente laico que en realidad no respeta mucho su posición de moderador, apoya manifiestamente las opiniones expresadas por Salviati y deja a menudo en ridículo a Simplicio, el cual, todo sea dicho, no brilla por su inteligencia. Por otra parte, el cometido de nuestro científico estaba claro: desmantelar en sus fundamentos toda la física y la cosmología aristotélicas, y en esta obra —lo demuestran los hechos— fue efectivamente convincente.

La idea de Galileo —expresada en los discursos por boca de su *alter ego* Salviati— para medir la velocidad de la luz es en realidad muy sencilla. En efecto, se trata de poner a dos experimentadores a algunas millas de distancia el uno del otro y proveer a cada uno de ellos de una linterna. Cuando el primero descubre la propia linterna, la luz viaja hasta el segundo, el cual responde instantáneamente (los dos deben estar adiestrados para tener tiempos de reacción muy rápidos, como explica también Galileo por boca de Salviati) descubriendo la suya. La luz de la segunda linterna llega, pues, al primero, que puede así idealmente medir el tiempo transcurrido entre los dos viajes de ida y vuelta de la luz y calcular su velocidad. El diálogo sobre el tema acaba así:

sagredo La experiencia me parece una invención no menos segura que ingeniosa. Pero decidme qué habéis concluido al practicarla.

salviati Verdaderamente no la he experimentado, salvo a poca distancia, es decir, ni siquiera una milla, por lo que no he podido asegurarme si verdaderamente la aparición de la luz opuesta es instantánea.

Así, Galileo, muy consciente de la escasa sensibilidad de sus operaciones de medición, en 1638 declaraba su incapacidad de determinar a qué velocidad se propagaba la luz. A partir de este gran científico, muchos otros se han dedicado a lo largo de los años a tratar de medir la velocidad de la luz, cuya naturaleza ha fascinado a generaciones de estudiosos, filósofos y científicos.

Fue, de todos modos, no mucho tiempo después, en 1675, cuando el astrónomo danés Ole Christensen Rømer (1644-1710) consiguió determinar por primera vez el valor de *c* (de la inicial del término latino *celeritas,* «velocidad»), y se puede decir, sin duda, que en cierto sentido fue precisamente Galileo quien le proporcionó el punto de partida: Rømer, para efectuar su medición, empleó las observaciones de los satélites mediceos descubiertos 65 años antes por el sabio pisano. El científico danés se percató de que el tiempo de aparición y de sucesiva desaparición de una de dichas lunas —Ío, en particular— detrás del disco del planeta no era siempre el mismo, sino que dependía de la estación del año en que efectuaba la medición: él atribuyó entonces este hecho al movimiento de revolución de la Tierra en torno al Sol.

Conceptualmente, también la medición de Rømer es sencilla, pero, a diferencia de la de Galileo, tiene la suerte de beneficiarse de distancias mucho más considerables, teniendo en cuenta que la distancia media entre la Tierra y Júpiter es de unos 800 millones de kilómetros (a causa de los movimientos orbitales de los dos planetas, esta distancia no es obviamente constante, y oscila de un mínimo de unos 600 millones de kilómetros a un máximo de casi mil millones de kilómetros).

Consideremos, pues, el período del año en que nuestro planeta se mueve hacia Júpiter: si en el momento de la aparición de uno de los satélites la distancia que nos separa de este es D, en el momento de la sucesiva desaparición detrás del disco de Júpiter la distancia Tierra-satélite se habrá reducido en un tramo d, recorrido por la Tierra en ese tiempo. Ahora la luz deberá recorrer, por tanto, un tramo más breve, y precisamente largo (D-d). Cuando la Tierra se encuentra en la parte opuesta de su órbita, la situación se habrá invertido completamente. En el momento de la desaparición del satélite, la Tierra se habrá alejado, en cambio, la misma distancia d respecto del momento de la aparición (en que suponemos nuevamente la distancia Tierra-satélite equivalente a D), y la luz deberá ahora recorrer un tramo largo (D + d). Si la luz se hubiera propagado con velocidad infinita, Rømer no habría advertido ninguna diferencia de tiempo en

las dos situaciones. Por otra parte, era evidente, en cambio, la mayor longitud del período de visibilidad de un satélite en las condiciones en que la Tierra se alejaba de Júpiter respecto de cuando se acercaba. De las mediciones de los retardos observados, conociendo las características orbitales de la Tierra, de Júpiter y de los satélites mediceos, el astrónomo danés pudo deducir una velocidad de la luz de unos 220.000 kilómetros por segundo, con un error apenas superior al 25% respecto del valor hoy aceptado, incertidumbre que debe considerarse increíble con los medios de entonces. La presentación de las mediciones efectuadas por él, desarrollada en la Academia Francesa de Ciencias el 22 de noviembre de 1675, fue bien acogida, señal de que los tiempos habían cambiado, y supone una de las tantas importantes contribuciones que la astronomía ha proporcionado al desarrollo de las ciencias físicas.

Siguiendo la crónica, para tener la primera medición, por así decir, «terrestre» de la velocidad de la luz, habrá que esperar aún casi dos siglos, para ser precisos a 1849, con la irrupción del físico parisino Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896), el cual, como lo presentaba un historiador de la ciencia del siglo pasado, era un «buen ejemplo de esos pocos y ricos señores que ante los dudosos placeres de la vida elegante prefieren la satisfacción de los estudios» (Pitoni, 1911). Y los amados estudios lo condujeron, primero, a obtener una medición suficientemente exacta de *c* sobre la limitada distancia de 8.633 metros, la que separaba (y aún separa) la localidad de Suresnes, en la periferia de París, de la espléndida colina de Montmartre. El método utilizado, descrito en cualquier libro de física —a diferencia del de Rømer, relegado a pocos textos para aficionados—, es el conocidísimo de la rueda dentada que, puesta en rápido movimiento, permitía o no percibir el reflejo de un rayo de luz situado justamente a unos 8,5 km de distancia. Con este método, que retomaba esencialmente la experiencia de Galileo expresada por boca de su *alter ego* Salviati en el diálogo antes citado (pero sin la incógnita de los tiempos de reacción de los experimentadores), Fizeau obtuvo un valor de *c* sorprendentemente cercano al actual: 313.000 kilómetros por segundo. Su colega, conciudadano y amigo Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868; el mismo del péndulo, famoso para el gran público gracias también a la célebre novela de Umberto Eco [1932-2016]), como Fizeau, mejoró poco después el método sustituyendo la rueda dentada por un espejo rotante y permitiendo así la medición en distancias aún inferiores.

Desde aquel momento, generaciones de físicos se han sucedido en el intento, aparentemente sin fin, de mejorar la determinación de la

que ha demostrado ser, a pesar de muchos, una de las constantes fundamentales de la naturaleza. Como sostienen los autores de un conocido manual de física, las mediciones de la velocidad de la luz efectuadas desde los tiempos de Galileo son hoy «como un monumento a la perseverancia y el ingenio humano».

En aras de la exhaustividad, ahora la velocidad de la luz es considerada una referencia fundamental y es exactamente definida como equivalente a 299.792.458 metros por segundo —aproximada a los famosos «trescientos mil kilómetros por segundo»—, mientras que el metro se convierte en la unidad de medida derivada: ¡cualquier experimento del tipo antes descrito ya no sirve para medir la velocidad de la luz, sino la distancia recorrida!

AMANTES (DE TODO GÉNERO)

En el momento en que escribimos esta guía, el número de satélites confirmados de Júpiter es de 79, cifra solo superada por Saturno, que actualmente cuenta con 82. A cerca de la mitad se le ha asignado un nombre, recurriendo a los numerosos personajes de la mitología griega, partiendo primero de los amantes de Júpiter para pasar luego a sus descendientes (hijas y nietos, en concreto). Y es que según la mitología, parece que Júpiter tenía tantos problemas para controlar sus impulsos sexuales que entre esposas y amantes (inmortales y mortales) se cuentan varias decenas de relaciones, entre ellas algunas de tipo homosexual (como la que tuvo con el joven Ganimedes, al que Júpiter premió transformándolo en copero de los dioses).

Quien dio nombre a los cuatro satélites descubiertos por Galileo fue, en 1614, el astrónomo alemán Simon Mayr (más conocido con el nombre latinizado de Simon Marius [1573-1624]), que en su publicación *Mundus Iovialis* eligió —parece que por sugerencia de Kepler— a cuatro célebres amantes del señor de los dioses: la sacerdotisa Ío, la princesa Europa, el ya citado copero Ganimedes y la ninfa Calisto. Dicho sea de paso, Simon Mayr declaró también que era el verdadero descubridor de los satélites de Júpiter, iniciando una agria disputa con Galileo. Investigaciones históricas han establecido que, con toda probabilidad, Mayr contempló de verdad los satélites de manera independiente, pero anotó su descubrimiento al menos un día después de las observaciones de Galileo, que fechó el primer dibujo el 7 de enero de 1610. Curiosamente, pasaron casi cuatro siglos antes de que fuera descubierto un quinto satélite: gracias al astrónomo estadounidense Edward Emerson Barnard (1857-1923) —autor también del descubrimiento, en 1916, de la estrella que se desplaza más rápidamente en el cielo, llamada con justicia «estrella de

Barnard»—, en 1892 a los satélites galileanos se añadió **Amaltea.**

Es obvio que, entre las decenas de satélites de Júpiter, ocupan un puesto relevante los cuatro satélites galileanos, cuyas superficies han sido observadas y estudiadas de manera profunda gracias a diversas misiones interplanetarias, que han revelado, por un lado, detalles de notable interés para los planetólogos, y, por otro, paisajes únicos, cada uno distinto del otro y por eso merecedores de una excursión. También en este caso es preciso prestar atención al tipo de experiencia de la que se quiere disfrutar, porque el abanico de opciones va desde el simple *fly-by,* o sea, el sobrevuelo a corta distancia, hasta la entrada en órbita para observar toda la superficie del satélite, pasando incluso por el aterrizaje, que incluye la correspondiente exploración del terreno y de los paisajes circundantes.

Quien, entre los lectores de esta guía, sea aficionado a los volcanes, preferiblemente activos, debe contemplar, como absolutamente ineludible, la excursión con aterrizaje en **Ío**, el satélite mediceo más cercano a Júpiter. En efecto, en esta luna se observa la actividad volcánica más intensa de todo nuestro sistema planetario, producida por centenares de volcanes y calderas activas que generan incesantes coladas lávicas, algunas incluso de centenares de kilómetros de extensión, que cubren —y renuevan— amplia parte de la corteza superficial del satélite. Este es el motivo por el cual en Ío los cráteres de impacto son muy raros, y los más antiguos ya han sido rellenados y cubiertos por la lava.

Además de las rocas negras, típicas de los paisajes volcánicos también en la Tierra, los colores de Ío, fácilmente visibles en las imágenes recogidas por varias misiones espaciales, varían del rojo al naranja y al amarillo, reflejando aquellos compuestos del azufre más o menos abundantes en las diversas zonas. Es obvio que aquí, como en las otras lunas, el astrobús con el que habéis emprendido el crucero no puede bajar, sino que se necesitan módulos adecuados —puestos a disposición por las agencias turísticas locales, especializadas en paseos nocturnos para ir a observar los descensos de las coladas de lava—, resistentes a las altas temperaturas y a las sustancias corrosivas que se encuentran con seguridad en esta Luna.

Esta condición de Ío, ligeramente más grande que «nuestra» Luna pero donde se encuentran montañas más altas que las terrestres **(Boösaule Montes** alcanza los 17.500 metros de altura, más del doble de la del Everest), se debe a su extrema cercanía con el planeta, cuya gravedad es capaz de «sacudir» también el cuerpo sólido de Ío... que en realidad no es completamente sólido, precisamente a causa de las intensas fuerzas de marea, que actúan en la luna comprimiéndola y

alargándola continuamente (a esta acción contribuyen en parte también las otras lunas). Este proceso deriva, en consecuencia, en el calentamiento del interior del satélite, que nunca consigue completar la solidificación. Las rocas fundidas y calientes empujan, por tanto, para emerger a la superficie, creando los volcanes de los que luego erupcionan en forma de lava. En algunos casos, la violencia de las erupciones empuja *lapilli* y lava hasta algunos centenares de kilómetros de altura. Como hemos visto antes, una parte de estos materiales es captada por el campo magnético de Júpiter y contribuirá a alimentar las magníficas auroras polares del planeta.

Precisamente uno de estos penachos de lava estuvo en el origen del descubrimiento de la actividad volcánica de Ío. Fue gracias a la sonda *Voyager 1,* en 1979, cuando se observó un penacho elevarse más de 300 kilómetros de la superficie de Ío. Posteriores indagaciones mostraron que este penacho, si bien no persistente, estaba originado por el que ahora sabemos que es un enorme volcán activo, llamado **Pele** (en honor de la diosa hawaiana de los volcanes), segundo en dimensión solo después del marciano Olympus Mons. También Pele es un volcán en escudo, justamente como los hawaianos, con un diámetro en la base de 1.400 kilómetros y un cráter de 30 por 20 kilómetros. En realidad, las observaciones muestran que la actividad volcánica está limitada a algunos «puntos calientes» a lo largo de los márgenes y no a todo el cráter. La hipótesis es que el cráter es, en realidad, un gran lago de lava solidificada y que estos puntos calientes son las áreas en que la corteza se rompe y deja salir a la superficie nueva lava que va a cubrir la capa precedente, también con fenómenos espectaculares, como las fuentes de lava.

Si, después de haber visitado el volcán Pele, aún no estáis cansados (¡ni acalorados ni desfigurados por la cantidad de radiaciones absorbida paseando por la superficie de Ío!), podéis pedir a vuestro guía que os lleve a visitar también el volcán en caldera más grande del Sistema Solar: se trata de **Loki Patera,** de 200 kilómetros de diámetro, un lago de lava incandescente en el centro del cual se encuentra incluso una isla pero al que solo es posible llegar después de haber obtenido un permiso especial de las autoridades de Ío, dado que estamos en un área protegida (¡y muy bien protegida, en efecto!). El nombre, como el de otras características morfológicas presentes en la superficie de Ío, se inspira en la mitología nórdica, como bien saben los apasionados del universo Marvel, donde Loki es hijo de Odín y hermanastro del dios del trueno Thor, además de uno de los más temibles supercriminales creados por Stan Lee (1922-2018), el entusiasta inventor de superhéroes de cómic. En la mitología, Loki es,

en cambio, el dios del engaño y está asociado al fuego, lo que explica el acertadísimo nombre atribuido a la caldera de Ío, que vista desde lejos parece un lago pero en realidad no lo es. Es más, no busquéis agua. En Ío está prácticamente ausente —y esta también es una característica única—, probablemente evaporada por el calor producido por las erupciones volcánicas. Si tenéis sed, vuestra única tabla de salvación son las numerosas cantimploras que es de suponer que hayáis acarreado (aunque algunos módulos de lujo tienen dispensadores gratuitos).

Visto desde Ío, Júpiter es un disco enorme, imponente, que ocupa gran parte del cielo... ¡siempre y cuando uno se encuentre en el hemisferio correcto del satélite! Sí, porque, como ocurre con nuestra Luna, también Ío —al igual que los otros satélites galileanos— su período de rotación está sincronizado con el de revolución. Esto significa que tiene un hemisferio siempre vuelto hacia el planeta, mientras que el otro apunta siempre en dirección opuesta. En todo caso, si estáis en la cara orientada a Júpiter, a veces tendréis oportunidad de ver moverse sobre la superficie del planeta uno o más pequeños discos negros: son las sombras de los satélites proyectadas por el Sol sobre las nubes jovianas. Estos **eclipses,** precedidos y seguidos por **ocultaciones,** o sea, por momentos en que es el disco de Júpiter el que esconde completamente de la vista los satélites, son observables también desde nuestro planeta, ¡pero es obvio que asistir a un eclipse solar producido por las «lunas mediceas» estando en órbita en torno al planeta debe de producir una impresión muy distinta!

Dicho sea de paso, si os encontráis en la cara de Ío vuelta hacia Júpiter, veréis que el planeta ocupa el 5% de vuestro cielo, y se presenta con un diámetro aparente de casi 40 veces el de nuestra Luna llena. Pero aún más increíble debe de ser la visión de Júpiter desde **Metis,** el más interior del sistema de satélites. Visto desde su superficie, el gigante gaseoso tiene un diámetro aparente 130 veces mayor que el de la Luna llena y ocupa casi el 20% del cielo del satélite. En la fase de «Júpiter lleno», la luz del planeta ilumina la superficie de Metis con una intensidad varios miles de veces mayor que la de un plenilunio en la Tierra. En la práctica, durante las noches de Júpiter lleno, es posible desplazarse tranquilamente a Metis sin necesidad de iluminación artificial (¡aunque toda esta luz nocturna podría ser un problema para quien sufre de trastornos del sueño!).

Europa, que solo incidentalmente comparte el nombre con nuestro querido y viejo continente, es un mundo completamente distinto. En efecto, a diferencia del volcánico Ío, su superficie es una espesa

lámina de hielo de agua, blanca y lisa, prácticamente libre de relieves o valles, si se excluye algún residuo de cráter meteórico reciente. En resumen, es el lugar ideal para unas vacaciones si uno es aficionado al patinaje sobre hielo. Pensad qué maravilla poder hacer un largo recorrido patinando sobre el satélite, incluso de decenas o centenares de kilómetros, sin encontrar ningún obstáculo... aunque, cuidado, a veces el hielo se rompe en témpanos flotantes (un poco como en el océano Glaciar Ártico) y se vuelve peligroso. De las fracturas emerge agua proveniente de la capa subyacente, que debe de ser rica en elementos químicos porque, cuando se evapora, deja depósitos de un intenso color pardo-rojizo. El choque entre témpanos es capaz de levantar el hielo, produciendo unos pequeños relieves que nunca superan los pocos centenares de metros. Observado desde cerca, pues, Europa os parecerá como una enorme esfera helada, ligeramente más pequeña que nuestra Luna y surcada por largos rastros de color, constituidos precisamente por los minerales expulsados a la superficie por el agua que brota de las fracturas entre los témpanos.

Precisamente esta agua que emerge de las profundidades de la luna hace pensar que en Europa, bajo la espesa capa de corteza helada, es posible que exista un profundo **océano** de agua líquida, probablemente calentada no solo por las fuerzas de las mareas producidas por la cercanía a Júpiter (responsable de las fracturas de la corteza helada) sino también por la presencia, en el fondo, de volcanes submarinos o bocas hidrotermales. Esto explica por qué muchos investigadores se están interesando por esta luna. Y es que muchos sostienen que el océano de Europa es uno de los lugares del Sistema Solar en que podría haberse formado la vida, al menos tal como la conocemos. En efecto, todos los ingredientes básicos están presentes, y hasta en abundancia: agua líquida (incluso se estima que en Europa hay mucha más agua que en la Tierra), elementos químicos y fuentes de energía. No os preocupéis, por tanto, si en el curso de vuestras peregrinaciones sobre el hielo veis emerger de una fractura quién sabe qué criatura marina de formas inquietantes: podríais estar en presencia de la primera forma de vida alienígena jamás conocida. Y vosotros podríais ser los primeros afortunados en descubrirla. Si luego queréis participar activamente en la búsqueda, no os queda más que excavar el hielo superficial hasta llegar al océano subterráneo y sumergiros en sus aguas densas y oscuras. Pero, cuidado, no basta con ser grandes expertos en inmersiones subacuáticas, ni son útiles las escafandras de buzo: el único modo de moverse a esas profundidades (y a esas presiones, por tanto) es descender con un batiscafo. Pero en el momento en que estamos escribiendo esta guía, ninguna compañía

turística propone batiscafos de alquiler para excursiones oceanográficas en Europa. Podríais crear vosotros una *start-up:* acaso dentro de algunos años, cuando tengamos la certeza de que el océano de Europa está poblado de increíbles criaturas abismales, vuestro mercado ya no será un nicho (también porque está orientado al *luxury)* y ¡muchos querrán ver en persona los «peces alienígenas»! Pero, por desgracia, aún no tenemos la certeza de que exista el océano, por lo cual, de momento, solo podemos echar mano de nuestra imaginación.

La tercera excursión de nuestro largo (¡y costoso!) crucero en torno al Sistema Solar en miniatura representado por los satélites mediceos en órbita alrededor del gigante gaseoso nos lleva a **Ganimedes,** el más grande no solo de los cuatro, sino de todo el Sistema Solar. En dimensión, Ganimedes es incluso más grande que Mercurio, pero, como muestra la evidencia (lo que significa simplemente aplicar la tercera ley de Kepler al sistema Júpiter-Ganimedes), es mucho menos «pesado»: Ganimedes tiene una masa equivalente a la mitad del planeta más cercano al Sol. Como podéis imaginar, esto significa que está preferentemente compuesto por materiales más ligeros con respecto a los metales como el hierro que encontramos en abundancia en los planetas terrestres como Mercurio, justamente. Y, hallándose en una región del espacio en que evidentemente el agua abunda (¡nos lo demuestra Europa!), ¿de qué puede estar compuesto Ganimedes sino de agua? En efecto, el satélite mediceo dedicado al copero de los dioses no solo tiene una corteza sólida resultado de un *mix* de rocas y hielo, sino que —¡oíd, oíd!— ¡podría tener también un océano subterráneo de agua líquida, precisamente como Europa!

La superficie rocosa de Ganimedes está salpicada de cráteres, crestas, relieves y largos valles, que se presentan en forma de acanaladuras, conocidas con el nombre de **surcos.** Algunas zonas, de coloración oscura, son más ricas en cráteres y, por tanto, más viejas. Otras, más claras y más extensas, tienen menos y son, en consecuencia, de formación más reciente. Estas áreas claras, que se parecen a los mares lunares, son, efectivamente, regiones originadas por actividades tectónicas o por violentos impactos meteóricos... pero las cuencas, en vez de llenarse de lava fundida, como ha ocurrido en la Luna, se han llenado de agua disuelta por el impacto y luego nuevamente solidificada, dadas las temperaturas extremadamente bajas presentes en la superficie del satélite.

Hasta aquí podríais pensar que Ganimedes, aparte del océano subterráneo, no tiene grandes alicientes para el astroturista ocasional. Pero obviamente os equivocáis. Porque después de las auroras polares

terrestres y las jovianas, aquí tendréis ocasión de asistir nuevamente a este maravilloso espectáculo de la naturaleza. Y ya puestos a explayarnos, digamos que Ganimedes debe de tener algo de hierro en su núcleo central, porque en el exterior presenta un campo magnético propio que, de otro modo, no podría existir. Y es gracias a este campo magnético —y a una tenue atmósfera, donde está presente también el oxígeno molecular— como el más grande de los satélites galileanos puede producir los **fenómenos aurorales,** además de interactuar con el campo magnético de Júpiter.

Cuarto en orden de distancia del planeta, pero segundo en dimensión después de Ganimedes (y tercero de todo el Sistema Solar, después de Ganimedes, justamente, y Titán, el satélite más grande de Saturno), está **Calisto,** el satélite de superficie más antigua y más craterizada del Sistema Solar. Si lo miramos desde la ventanilla de nuestro astrobús, revela una corteza rocosa y completamente cubierta de cráteres, sin manifestaciones de actividades volcánicas y tectónicas como las mostradas por los otros tres «compañeros de brigada». Pero sabemos que también Calisto, con una masa de un tercio de la de Mercurio, aun teniendo dimensiones comparables, está compuesto no solo por rocas, sino también por mucha agua, que en la superficie se presenta como hielo pero que en el subsuelo podría encontrarse en estado líquido, exactamente como en Europa y Ganimedes. Sin embargo, el hipotético océano subterráneo de Calisto sería mucho más profundo, contaría con mucha menos agua y, según algunos, podría incluso no existir.

Pero a los astroturistas del sistema joviano les queda, en cualquier caso, una etapa fundamental, incluso por una cuestión estrictamente económica. En efecto, muchos turoperadores ofrecen paquetes completos que prevén excursiones a las cuatro lunas galileanas a precios significativamente rebajados con respecto a los que se pagarían comprando las distintas excursiones por separado (algunos operadores especialmente «agresivos» han irrumpido en el mercado turístico del sistema joviano ofreciendo descuentos de hasta el 30%: ¡en la práctica una excursión es gratuita!). En todo caso, el aterrizaje en Calisto, que tiene también una tenue atmósfera compuesta esencialmente por dióxido de carbono, os permite tocar rocas con una edad superior a 4.000 millones de años, pasear dentro de cráteres creados por prolongados bombardeos de cometas y asteroides, ver de cerca encrespaduras generadas por olas de agua congelada y disfrutar de la estancia —finalmente— en una superficie geológicamente estable y en una luna cuyo nivel de radiaciones de partículas empujadas por el campo magnético joviano es de los más bajos (más,

incluso, que los que se miden en nuestro planeta). En efecto, Calisto se encuentra apenas fuera de la franja de radiación de Júpiter, por lo que su interacción con la magnetosfera joviana es muy limitada.

Por todos estos motivos, que lo hacen potencialmente más «habitable» que los otros satélites galileanos, Calisto es considerado por muchos expertos una de las posibles avanzadillas para la colonización humana del espacio y, en particular, para el estudio cercano del sistema joviano. Calisto podría así convertirse no solo en meta astroturística, sino en laboratorio de investigación, área de descanso, estación de aprovisionamiento y base de lanzamiento hacia otras metas más lejanas del Sistema Solar, aprovechando también el impulso gravitatorio de Júpiter. ¡Quién sabe si después de vuestra visita no queréis ofreceros como voluntarios para su colonización!

Con Calisto, las excursiones por el sistema joviano han terminado y podéis, por tanto, reanudar vuestro viaje interplanetario, pero... esperad, alguien ha vuelto la mirada hacia atrás por la ventanilla de cola y ha lanzado un grito de asombro. ¿Qué habrá visto? Está gritando: «¡Anillos!», pero vosotros sabéis muy bien que os encontráis en torno a Júpiter, no en las proximidades de Saturno. ¿Una alucinación? Pues claro que no, porque también Júpiter tiene su **sistema de anillos** (¡inimaginable que el señor de los dioses careciese de esto!), que fue casualmente descubierto por la sonda *Voyager 1*. Las guías turísticas no suelen hablar de los anillos de Júpiter, que son muy oscuros, no particularmente extensos y, en consecuencia, mucho menos luminosos y evidentes que los de Saturno. La idea que sostienen los investigadores es que están esencialmente constituidos por pequeños fragmentos de material rocoso con escaso poder reflectante, a diferencia de los de Saturno, que sabemos que están compuestos preferentemente por hielo y, por tanto, son capaces de reflejar muy bien la luz solar.

Los anillos de Júpiter no ofrecen un gran espectáculo, pero son, en cualquier caso, un modo elegante, y en cierto sentido sorprendente, del planeta de despedir al astroturista y de dejarle con la impresión de que no ha visto todo lo que había que ver. Y lo cierto es que es así. Pero otras metas nos esperan, y, estad seguros, ¡serán al menos tan sorprendentes (si no más) como las que acabamos de visitar!

CAPÍTULO 6

EL VERDADERO «SEÑOR DE LOS ANILLOS»

SATURNO

PLANETA

Masa: 95,16 veces la masa de la Tierra
Radio medio: 58.232 km
Temperatura efectiva: –178 °C
Duración del día: 10,66 horas
Duración del año: 29,48 años terrestres
Número de satélites: 82 (confirmados)
Posee sistema de anillos planetarios: sí

Los anillos están siempre asociados a las promesas. Y Saturno, con su único e inimitable sistema de anillos, promete dar un espectáculo incluso mirándolo de lejos, con un pequeño telescopio de aficionado. ¡Imaginaos entonces cómo debe de ser ver los anillos de cerca! El viaje es largo —tendréis tiempo de leer toda la saga de *El Señor de los Anillos* de J. R. R. Tolkien (1892-1973), incluso más de una vez—, pero cuando lleguéis a destino os encontraréis delante del verdadero «Señor de los Anillos»: el gigante gaseoso con un sistema de anillos que no tiene parangón en nuestro Sistema Solar.

El astroturista que se embarca en un vuelo hacia Saturno sabe que el coste del viaje —siempre elevado, incluso optando por un vuelo chárter o una compañía *low cost,* que han proliferado en el largo período de liberalización de los niveles de servicios esenciales que debe incluir el billete básico de un vuelo interplanetario— quedará ampliamente compensado por una de las experiencias más increíbles de las que se pueda disfrutar, al menos en nuestro sistema planetario. Y luego no olvidéis que Saturno, además de los anillos, es un **gigante gaseoso** muy respetable (el segundo después de Júpiter) y con el más imponente cortejo de **satélites** de todo el Sistema Solar; tiene más que

Júpiter, ¡82 frente a 79! Es verdad, parece el resultado de un partido de baloncesto, pero os garantizamos que son los números de los satélites de Saturno y de Júpiter, respectivamente. Muy lejos, pues, de los resultados futbolísticos tipo 1-0, para el *match* Tierra-Venus, o 2-1, para el desafío Marte-Tierra. Y entre los satélites de Saturno, como veremos, hay algunos absolutamente dignos de una excursión.

EL CONTROLADOR DEL TIEMPO

En la mitología romana Saturno es el equivalente de la divinidad griega de Cronos, que, además de tener la pésima característica de comerse a sus hijos recién nacidos, es también el dios que representa el paso del tiempo *(kronos* en griego significa «tiempo»; pero en la mitología originaria Cronos y Chronos, el «verdadero» dios del tiempo, son dos divinidades distintas). Lejos de ser comunista —en la propaganda anticomunista difundida en Italia después del fin de la Segunda Guerra Mundial era célebre el eslogan según el cual los comunistas se comían a los niños, ¡aunque el mito cuenta que castró a su padre, Urano, valiéndose precisamente de una hoz!—, Saturno se alimentó de sus hijos sencillamente para que no se cumpliese lo que le había anunciado el oráculo, esto es, que uno de ellos lo derrocaría. Desgraciadamente para él, su mujer, Rea, le oculta el nacimiento de Zeus (Júpiter, para los latinos), que, como todos sabemos, conseguirá convertirse de verdad en el señor del Olimpo y jefe de todos los dioses. A Cronos solo le quedará el poder de representar el tiempo, que, en la alegoría del mito, lo devora todo, sin detenerse ante nada ni nadie, ni siquiera sus hijos. Quizás el nombre del planeta deriva precisamente de esto: es el más lento de todos, entre los conocidos en la antigüedad, y, por tanto, mucho más adecuado que los otros para representar el lento pero inexorable paso del tiempo.

Ahora bien, gracias al uso de los telescopios, sabemos que existen planetas, planetas enanos y asteroides mucho más lentos que Saturno, ¡pero, por desgracia, ninguno de estos es visible a simple vista! Los cometas no eran considerados fenómenos celestes, por lo que tampoco fueron tenidos en cuenta como instrumentos «marcatiempo».

EL PLANETA TRICORPÓREO (Y OTROS ANAGRAMAS)

El primero que comprendió que había algo que no funcionaba en el aspecto del planeta fue naturalmente Galileo Galilei, que apuntó su telescopio hacia Saturno en 1610. En efecto, observado desde la Tierra, a simple vista, el planeta parece un punto brillante sobre el fondo negro del cielo, sin ninguna estructura reseñable, con una

tonalidad de color amarillento, como Júpiter, aunque menos brillante. Pero mirando a través de las lentes de su instrumento, Galileo ve que el disco del planeta estaba flanqueado, en posiciones diametralmente opuestas, por dos bultos laterales, que interpretó como satélites, aunque extremadamente más grandes y cercanos al planeta que los que había descubierto poco antes en órbita en torno a Júpiter. Y del mismo modo que había elegido para anunciar el descubrimiento de las fases de Venus, el científico pisano se divirtió escondiendo la que definió como una «extravagantísima maravilla» detrás de un anagrama totalmente incomprensible: «smaismrmilmepoetaleumibunenugttauiras».

La noticia, escrita inicialmente en una carta enviada en el verano de 1610 a un político florentino, llegó, a través del contacto con Juliano de Médicis, también a Kepler, que nuevamente se puso a prueba en el intento de resolver el arcano. El texto, en el desciframiento del astrónomo germano, debía ser «Salve umbistineum geminatum Martia proles» (definido por el propio Kepler como un «bárbaro verso latino»), cuya posible traducción sería «Salud, furiosos gemelos, prole de Marte». En la práctica, según Kepler, ¡Galileo había descubierto que Marte tenía dos satélites! Ahora bien, lo curioso es que Marte tiene en realidad dos satélites, como hemos visto, pero Galileo no habría podido nunca descubrirlos con su anteojo porque su luminosidad es demasiado débil para ser vistos con un instrumento de ese tipo.

Leyendo sobre este asunto, parece que Kepler tenía una especial predisposición a identificar en los anagramas de Galileo signos de descubrimientos futuros, habida cuenta de que también para el anuncio de Venus, el mensaje escondido del científico pisano había sido descifrado por Kepler con la frase «Macula rufa in Iove est giratus mathem etc.», que significa «En Júpiter hay una mancha roja que gira matemáticamente». En efecto, también en este caso sabemos que un enorme vórtice denominado Gran Mancha Roja es realmente observable en la superficie visible de Júpiter, pero sabemos asimismo que el primero en observarla fue Giovanni Domenico Cassini, más de medio siglo después, en 1665.

Pero entonces, ¿qué significaba el mensaje cifrado de Galileo? Pues bien, la revelación, llegada algún tiempo después, debía ser leída así: «Altissimum planetam tergeminum observavi», cuyo significado literal es: «he observado el planeta más alto en su triple forma», o sea: Saturno, que es el planeta más alto (tanto en el sistema tolemaico como en el copernicano, por suerte para Galileo), está formado por tres cuerpos en vez de uno solo. Y de hecho en los primeros dibujos de

Galileo Saturno aparece como un cuerpo central a cuyos lados se encuentran dos cuerpos más pequeños. El estupor de Galileo frente a esta observación es tal que en la carta expedida desde Florencia el 13 de noviembre de 1610 y dirigida a Praga, destinada a Juliano de Médicis, en que revela el significado del mensaje cifrado, prosigue: «Esto es, que Saturno, con mi grandísima admiración, he observado que es no una estrella sola, sino tres juntas, que casi se tocan».

Ante la imposibilidad de comprender plenamente el descubrimiento, Galileo no se desanima, y continúa observando el planeta también en los meses y en los años sucesivos. Hasta que, en 1612, con gran sorpresa, el planeta pierde su extrañeza y en el telescopio aparece como un pequeño disco aislado, exactamente como los otros. Hombre de gran cultura y, por tanto, conocedor del mito de Cronos del que hemos hablado antes, anota, no sin preocupación: «¿Acaso Saturno ha devorado a sus propios hijos?». Pasan algunos años más y Saturno vuelve a adquirir un aspecto extraño, pero distinto del «triple» de las primeras observaciones. Ahora el cuerpo central aparece de nuevo flanqueado por dos estructuras en posiciones diametralmente opuestas, pero ya no redondas, sino de forma elíptica, y con una región oscura que las separa del disco del planeta.

Desgraciadamente para Galileo, su telescopio no es tan potente como para permitirle entender con precisión qué está observando realmente y comprender el aspecto mudable del planeta con el paso de los años. Y habrá de ser el holandés Christiaan Huygens, en 1655, quien descubra que aquello que había visto el científico pisano era, en realidad, un anillo que rodeaba el planeta a la altura del ecuador y explique, en su *Systema Saturnium,* publicado en La Haya en 1659, que los diversos aspectos con que se había presentado al telescopio de Galileo se debían, en verdad, a las diversas inclinaciones que el anillo asume respecto del observador terrestre en el curso de los movimientos orbitales de los dos planetas. Con ocasión de la primera confirmación del anillo en torno al planeta y del descubrimiento del satélite Titán, siempre en 1655, se suscitó una disputa con el óptico italiano Eustachio Divini (1610-1685), considerado uno de los mejores constructores de telescopios de la época, que, en un intercambio de recíprocas acusaciones y ofensas, fue definido por Huygens como un «vilem vitrarium arteficem», o sea, un «vulgar vidriero». En la discusión se vio implicada incluso la Academia del Experimento, que en 1664 sancionó definitivamente que la interpretación del sistema de Saturno proporcionada por Huygens era coherente con las observaciones y, por tanto, correcta.

Siguiendo la moda de la época y tomando ejemplo de Galileo,

también Huygens, para anunciar al mundo su descubrimiento, recurrió a un anagrama, pero evidentemente no teniendo ganas de aventurarse en complejas reelaboraciones, se limitó a poner en fila las letras que debían componer la frase reveladora: «aaaaaa cccc d eeeee g h iiiiiii llll mm nnnnnnnnn oooo pp q rr s ttttt uuuuu». Un modo sin duda inusual de decir: «Annulo cingitur, tenui, plano, nusquam cohaerente, ad eclipticam inclinato», que significa «[El planeta Saturno] está rodeado por un anillo sutil, plano, que no lo toca en ningún punto, inclinado respecto de la elíptica». Así reza el desciframiento del mensaje que describía por primera vez el sistema de anillos —pues en realidad no se trata de un solo anillo, sino de un complejo y denso conjunto de anillos concéntricos— que todo astroturista que se precie debe visitar al menos una vez en la vida.

LA PROMESA (MANTENIDA) DE LOS ANILLOS

Gracias primero a las observaciones con telescopios cada vez más potentes y, después, a las misiones espaciales que han visitado Saturno —en este orden, *Pioneer 11, Voyager 1, Voyager 2* y, sobre todo, *Cassini-Huygens*—, ahora sabemos que el anillo observado por Huygens no era un cuerpo individual, compacto, dispuesto como un cinturón en torno al planeta, sino que, en realidad, está compuesto por varios anillos principales, a su vez compuestos por una multitud de anillos muy finos y cercanos. Típicamente, entre un anillo principal y el otro se encuentra una **laguna,** una zona vacía, carente o casi del material —fragmentos de hielo de agua mezclado con polvo— del que están constituidos los anillos. El primero en observar uno de estos espacios vacíos y, por tanto, en descubrir que el anillo no era un cuerpo único, sino compuesto por al menos dos elementos concéntricos, fue, en 1675, el astrónomo italiano Giovanni Domenico Cassini (el mismo que 10 años antes había descubierto la Gran Mancha Roja en Júpiter). Este espacio vacío entre los anillos, el más extenso y, por tanto, fácil de observar, fue denominado en su honor **división de Cassini.**

Conforme os vayáis acercando al sistema, desde las ventanillas de vuestro astrobús serán cada vez más evidentes los detalles de la estructura de los anillos, con cada anillo principal compuesto por una miríada de pequeños anillos concéntricos y separado por lagunas más o menos anchas, denominadas «divisiones» o «separaciones». Las divisiones y separaciones toman el nombre de científicos, como la división de Cassini, justamente, mientras que los anillos están sencillamente indicados con las letras del alfabeto latino. Así, por ejemplo, la división de Cassini separa el **anillo A,** más externo y brillante (porque presenta mayor densidad de pequeños anillos

concéntricos), del **anillo B,** más interior, más rarefacto y, por tanto, menos luminoso.

En conjunto, el sistema principal de anillos, compuesto por los tres anillos más brillantes, A, B y C —bien reconocibles también por observación desde la Tierra—, se extiende de unos 75.000 kilómetros (anillo C) a casi 140.000 kilómetros (anillo A) del centro del planeta, que tiene un radio medio de unos 58.000 kilómetros, aunque existen un anillo más interior al C (el D) y otros anillos más externos al A (los anillos E, F y G), mucho más tenues y rarefactos.

Las lagunas entre un anillo y el otro no están allí por casualidad, obviamente. Es la presencia de algunos satélites la que hace inestables esas órbitas y no permite, por tanto, que hipotéticos fragmentos se estabilicen en esas regiones. Un caso especial es el de la **división de Encke** —llamada así en honor del astrónomo alemán Johann Encke (1791-1865)—, interior al anillo A: en este espacio orbita el pequeño satélite **Pan,** que, evidentemente, tiene vía libre y despejada de detritos.

La fuerza de gravedad de algunos satélites siempre es capaz de controlar y mantener en orden las órbitas de algunos anillos: por ese motivo, las lunas que desarrollan este papel son llamadas «**satélites pastores»,** precisamente porque guían el «rebaño» de fragmentos a lo largo de la órbita correcta para que ninguno de ellos se pierda y empiece a vagar por los pastos del espacio interplanetario. Una excursión arriba o abajo del plano de los anillos os permitirá reconocer con extrema facilidad estas lunas, inmersas en el sistema de anillos y capaces de mantenerlo ordenado. Y descubriréis también otra curiosidad: en la división de Encke, además de Pan, se encuentra también un sutil anillo, visto por primera vez por la sonda *Cassini*.

Leyendo la historia de las observaciones realizadas por Galileo, sin duda se os habrá despertado la curiosidad por entender por qué los anillos fueron primero vistos como dos discos más pequeños, luego desaparecieron y después volvieron a ser visibles en forma de elipse, como si fueran una especie de «asas» del cuerpo central *(ansae,* o sea, «asas», fue precisamente el nombre usado por Galileo para describir lo que estaba observando). Pues bien, la explicación la ofreció precisamente Huygens en su tratado de 1659: el sistema de anillos está inclinado 27° respecto del plano sobre el que orbita Saturno (y también nuestro planeta). Así, y dependiendo de las posiciones orbitales de la Tierra y de Saturno, en ocasiones el sistema puede verse en la máxima angulación, en forma de dos arcos de elipse apoyados en el disco del planeta (las *ansae,* justamente), pero puede también ocurrir que nuestro planeta atraviese el plano de los anillos y

que, por tanto, estos, al estar posicionados de lado respecto de la línea de observación, se vuelvan invisibles. Fue precisamente esta circunstancia, en 1612, la que puso en entredicho a Galileo.

En efecto, ¡también vosotros podéis experimentar y asombraros con esta desaparición! Sí, porque bastará con que durante el viaje de acercamiento a Saturno vuestro astrobús atraviese el plano de los anillos para mostraros en directo y desde cerca lo que experimentó Galileo con su telescopio —y que experimentan todos los observadores terrestres cada 15 años—, o sea, la aparente desaparición de los anillos. Llegados a este punto, podríais también preguntaros cómo puede desaparecer mágicamente un sistema tan extenso y brillante como el de los anillos de Saturno, y la respuesta es que, por más que en horizontal tengan una extensión de decenas de miles de kilómetros, el espesor típico es de apenas 10 metros (solo en ciertos casos, cuando sufren la acción gravitatoria de los satélites que pasan por las cercanías, los fragmentos se elevan algunos kilómetros por encima del plano de los anillos, que de otro modo tendrían el aspecto de un disco plano). Sí, habéis leído bien: ¡10 metros! En la práctica, estamos ante un disco extremadamente sutil y, en cualquier caso, capaz de ofrecer un espectáculo magnífico, aun cuando los anillos son observados a contraluz, o sea, mirándolos del lado en sombra respecto de la luz solar.

¿Finalmente se ha disipado cualquier duda sobre el coste del crucero? Los anillos de Saturno no decepcionan nunca a ningún viajero y mantienen siempre su promesa como espectáculo y maravilla de la naturaleza.

EL SATÉLITE FALLIDO

Después de haber visto de cerca los anillos, compuestos esencialmente por hielo de agua puro al 99,99%, en que se encuentran microscópicas impurezas en forma de polvo de silicatos y otros minerales, al astroturista curioso puede surgirle espontáneamente la pregunta: pero ¿por qué todo este material, constituido por fragmentos de dimensiones variables, de un centímetro a algunos metros, no se ha aglomerado para formar otra luna de Saturno? También en este caso, la respuesta le corresponde darla a la física de la gravitación. En efecto, habría suficiente materia, solo que... ¡está demasiado cerca del planeta! En la práctica, cualquier cuerpo de grandes dimensiones que se encontrara en órbita en torno a Saturno a esas distancias sería primero deformado y luego destruido por las fuerzas de marea del planeta. El motivo es que la fuerza de atracción del hemisferio más cercano al planeta tendría una intensidad mucho mayor que la que

atrae el hemisferio lejano, y la diferencia entre estas dos fuerzas sería capaz de reducir literalmente a migajas el satélite. El primero en demostrar sobre el papel esta afirmación, en 1848, fue el matemático y astrónomo francés Édouard Roche (1820-1883), que calculó la distancia del centro de cualquier cuerpo masivo —estrella o planeta— dentro de la cual no es posible la formación de otro cuerpo masivo que se mantenga junto por la propia fuerza de gravedad —planeta o satélite, respectivamente— que orbita alrededor del central. En efecto, esta distancia, llamada luego en su honor **límite de Roche,** es para Saturno mayor que aquella a la que se encuentran los anillos. Pocos años después, en 1857, el físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879), sin duda más conocido por las ecuaciones sobre el electromagnetismo que llevan su nombre, demostró que los anillos de Saturno no podían estar compuestos por un solo cuerpo sólido, sino que debían necesariamente estar constituidos por innumerables fragmentos sólidos de pequeñas dimensiones, cada uno en órbita independiente en torno al planeta. Ahora tenemos las pruebas de que estaba en lo cierto.

EL PLANETA FLOTANTE

Como gigante gaseoso, Saturno tiene características muy similares a las ya descritas para Júpiter, tanto por lo que respecta a la estructura interna como por lo que se refiere al aspecto con que se presenta la parte superior de la atmósfera, subdividida en franjas claras y oscuras dispuestas paralelamente al ecuador del planeta, aunque menos nítidas y distintas de las de su hermano mayor (que en la mitología griega es, en cambio, su hijo, ¡como ahora sabéis!). También la atmósfera de Saturno es batida por vientos muy intensos: en el ecuador, por ejemplo, se han observado vientos que soplan a una velocidad de 500 metros por segundo, que, hechas las debidas conversiones, ¡equivalen a 1.800 kilómetros por hora!

Sin embargo, siendo un planeta más pequeño y, sobre todo, más alejado (y, por tanto, más frío) del Sol respecto de Júpiter, las manifestaciones meteorológicas y climáticas que se observan en la atmósfera de Saturno son menos violentas y drásticas, salvo algunas raras pero, en cualquier caso, interesantes excepciones, dignas sin duda de dedicarles una excursión. Entre estas, encontramos un vórtice similar a la Gran Mancha Roja de Júpiter, pero mucho menos extenso, llamado —el nombre resulta tal vez un poco pretencioso— **Gran Mancha Blanca.** Pero, a diferencia de la GRM, el huracán en Saturno varía con las estaciones y se manifiesta habitualmente cuando el hemisferio septentrional del planeta está vuelto hacia el Sol.

¿Pero es que entonces Saturno tiene estaciones? La respuesta es afirmativa y el motivo es siempre el mismo: la inclinación del eje de rotación y, en consecuencia, del plano ecuatorial respecto del plano de la órbita. En efecto, Saturno tiene el plano ecuatorial inclinado unos 27° respecto del plano de la órbita, un valor no muy alejado del terrestre (que, lo recordamos, equivale a 23,5°). Lo que hace las estaciones de Saturno significativamente diferentes de las terrestres es, además de la distancia del Sol, con una consiguiente menor cantidad de radiación solar que azota la atmósfera, la duración: una estación saturniana dura más de siete años terrestres. En efecto, Saturno completa una órbita en torno al Sol en algo menos de 29 años y medio. Esto significa, por ejemplo, que la noche polar dura más de 14 años en un hemisferio y otros tantos en el otro. En cambio, el día saturniano dura muy poco: el planeta gira sobre sí mismo en menos de 11 horas, y en la particular clasificación de los «días más breves» entre los planetas del Sistema Solar se sitúa en el segundo puesto, inmediatamente después de Júpiter. A causa de esta rotación muy rápida en torno a su propio eje, Saturno muestra un notorio achatamiento en los polos, equivalente a casi un 10%, muy evidente en la observación telescópica. Ningún otro planeta muestra un achatamiento tan marcado.

Pero la atmósfera de Saturno reserva también una sorpresa invisible desde la Tierra. Solo gracias a las misiones espaciales que han visitado el planeta de cerca ha sido posible descubrir que, enroscada en torno al polo norte del planeta, aparece una formación única, al menos por lo que se refiere a la forma: se trata de un enorme vórtice de forma hexagonal, con lados de más de 14.000 km de longitud —mayor que el diámetro de nuestro planeta— y una profundidad estimada de varios kilómetros. En este **hexágono** de nubes, un complejo sistema de corrientes cuyo interior cambia de color según las estaciones (a causa de las diversas reacciones fotoquímicas desencadenadas o no por la radiación solar), los vientos soplan a 300 kilómetros por hora en torno a un ojo que, solo, tiene un diámetro de 2.000 kilómetros. Si vuestro crucero prevé también una órbita polar en torno a Saturno, no podéis perderos bajo ningún concepto esta espectacular tormenta, potente y misteriosa al mismo tiempo, porque aún no tiene explicación. Es cierto que los cruceros polares son aún más caros —porque exigen maniobras orbitales complejas y un mayor dispendio de energía— que aquellos con órbitas poco inclinadas respecto del plano orbital, pero, una vez llegados hasta aquí, ¿de verdad queréis perderos esta increíble forma geométrica constituida solo por nubes?

Visto desde las ventanillas de vuestro astrobús, el planeta parece

ciertamente masivo e imponente. Os sorprenderá, por tanto, saber que si existiera un inmenso océano de agua capaz de acogerlo... Saturno flotaría, ¡como una boya o un tapón de corcho! Y no porque tenga anillos que funcionan como salvavidas, sino sencillamente porque su densidad —magnitud física dada por la relación entre la masa de un cuerpo y su volumen relativo— es inferior a la del agua. Y también en esto el «Señor de los Anillos» es único en nuestro sistema planetario: todos los demás planetas se hundirían inexorablemente.

TITÁN, ¡QUÉ ATMÓSFERA!

Por ahora el crucero os ha llevado a sobrevolar el planeta y el soberbio sistema de anillos, pero por fin ha llegado el momento de estirar las piernas sobre alguna corteza sólida, poco importa si de rocas o de hielo. Al no poder descender sobre Saturno —los gigantes gaseosos no tienen superficies sobre las que aterrizar, y la suerte que correría un hipotético amerizaje sería incierta dado que no es posible saber hasta qué profundidad resistiría nuestro «batiscafo espacial» las presiones del gas circundante—, hay previstas excursiones a algunos satélites a pie o a bordo de todoterrenos u otros vehículos. Ahora bien, como hemos mencionado antes, Saturno tiene un amplio séquito de lunas, por lo que se nos plantea entonces la dificultad de elegir. A primera vista, se podría pensar que para hacer una excursión es oportuno elegir metas menos frecuentadas por los astroturistas del tipo de «visto y no visto» para poder disfrutar con mayor tranquilidad de la parada sin tener que moverse continuamente entre el gentío, pero es también verdad que los dos satélites —Titán y Encélado— son destinos obligatorios, y además, considerando que el sistema de Saturno es objetivo de cruceros exclusivos y, por tanto, aún no ha sido tocado por el astroturismo de masas, tampoco en los satélites más visitados encontraréis esas multitudes que os obligarán a tomar la decisión de regresar de inmediato a bordo del módulo espacial que os ha posado suavemente sobre la superficie.

Como ocurría con Júpiter, tampoco en el caso de Saturno todas las lunas tienen un nombre propio, pero si lo llevan —como la mayoría de las lunas conocidas hasta hoy—, estos hacen referencia a la mitología clásica griega y romana, especialmente a los titanes, figuras mitológicas hijas de Urano (el Cielo) y Gea (la Tierra, conocida también como Gaia). Saturno mismo era un titán. Sin embargo, gracias a las observaciones con telescopios cada vez más potentes, los satélites de Saturno han aumentado rápidamente de número, hasta el punto de superar el número de titanes descritos en los mitos. Pero los astrónomos, ya se sabe, son personas que no se desaniman fácilmente,

y han comenzado a acudir a otras mitologías (inuit, céltica y nórdica, en este caso específico) para elegir, por coherencia, figuras de gigantes asimilables a los titanes.

Curiosamente, el satélite principal de Saturno, **Titán,** no tiene el nombre de un titán, sino el nombre genérico de la figura mitológica, que le fue asignado por el astrónomo inglés John Herschel (1792-1871) en 1847: Huygens lo indicaba simplemente como Saturni Luna, «satélite de Saturno», quizá pensando que era el primer y único satélite natural del planeta. Observado por primera vez por el astrónomo holandés el 25 de marzo de 1655, Titán fue el quinto satélite del Sistema Solar que reveló su presencia después de los cuatro satélites galileanos, descubiertos 45 años antes. La mayor parte de los conocimientos que tenemos de esta luna los debemos a la misión conjunta NASA-ESA-ASI (que son respectivamente la agencia espacial estadounidense, la europea y la italiana), denominada *Cassini-Huygens* en honor de los dos primeros científicos que con sus estudios contribuyeron a levantar el velo sobre el planeta, su sistema de anillos y sus numerosos satélites (Cassini descubrió cuatro, además de percatarse de la división en los anillos). Pero el doble nombre de la misión daba a entender también que estaba compuesta por un *orbiter,* la sonda *Cassini* propiamente dicha, y por un módulo, *Huygens,* cuyo cometido era aterrizar por primera vez sobre la superficie de Titán.

Pero ¿por qué aterrizar en Titán, que, dicho sea de paso, es más grande que el planeta Mercurio (por lo que respecta a sus dimensiones, no a su masa) y, entre los satélites, el segundo, solo después del mediceo Ganimedes (tanto en dimensiones como en masa)? ¿Qué tiene de particular? Bueno, ¡si decidís hacer una excursión a esta luna, lo descubriréis directamente con vuestros ojos! En efecto, Titán es, entre todos los satélites del Sistema Solar, el único dotado de una atmósfera densa y estable. Y, además, no es una atmósfera cualquiera: la de Titán está constituida por una espesa capa de nitrógeno, y es rica en metano y otros hidrocarburos. En la práctica, se parece mucho a la atmósfera primordial que los científicos suponen que envolvía nuestro planeta antes de que con el tiempo intervinieran diversos factores (viento solar, impactos meteóricos, erupciones volcánicas) que la transformarían en la que es ahora, afortunadamente rica en oxígeno, gracias sobre todo a la acción de la fotosíntesis.

La misión *Cassini,* la primera que orbitó alrededor de Saturno, fue lanzada el 15 de octubre de 1997 y concluyó el 15 de septiembre de 2017 con una zambullida en medio de las nubes tormentosas de Saturno, después de más de 13 años de honrosa carrera (entró en

órbita alrededor de Saturno el 1 de julio de 2004, después de casi siete años de viaje) realizando observaciones cercanas de Saturno, del sistema de anillos y de muchas lunas de su amplio cortejo. (Un inciso: también la misión *Galileo,* enviada en 1989 por la NASA hacia Júpiter, primero desenganchó una sonda atmosférica y luego la sonda principal terminó su carrera el 21 de septiembre de 2003 con una zambullida suicida en la atmósfera joviana. El objetivo, en ambos casos, fue evitar cualquier posible contaminación de las lunas de Júpiter y Saturno con bacterias terrestres hipotéticamente llevadas por las sondas.)

Pero en la época de la zambullida en Saturno, *Cassini* hacía tiempo que no estaba en compañía de *Huygens*. En efecto, el módulo había abandonado la sonda madre el día de Navidad de 2004 para encaminar sus pasos, en completa soledad, rumbo a la misión suicida —se sabía desde el comienzo— que lo llevó el 14 de enero de 2005 a aterrizar sobre la superficie sólida de Titán después de haber atravesado completamente su densa y nebulosa atmósfera.

El «sacrificio» de *Huygens* y los numerosos vuelos sobrevolando de cerca la superficie de Titán por parte de la sonda *Cassini* han permitido a los astrónomos hacerse un esquema bastante detallado de la morfología del satélite y de sus características químicas y físicas. Ahora sabemos que Titán tiene mares, lagos, ríos, nubes y lluvia. Solo que los mares y los lagos no contienen agua, en los ríos no corre agua ni las nubes o la lluvia están compuestas de agua. De hecho, en lugar de agua, hay metano, que, en vez de hallarse en estado gaseoso como en nuestra atmósfera, se encuentra establemente en estado líquido a causa de las bajas temperaturas que imperan en el satélite: ¡la temperatura media de Titán es de unos –180 ˚C! (La presión atmosférica en la superficie es, en cambio, una vez y media la terrestre.)

Las dimensiones de los **lagos** observados en Titán varían de pocos kilómetros a algunas decenas de kilómetros —el más extenso, tan grande como el mar Caspio, es el **Kraken Mare,** dedicado al monstruo marino a menudo representado como un calamar gigante, en cuyo interior se encuentran varias islas, la más importante de las cuales es la **Mayda Insula,** llamada así en honor de la legendaria isla atlántica de Maida (¡la Mayda Insula ostenta el gran privilegio de ser la primera isla extraterrestre que tiene nombre propio!)—, mientras que, por lo que respecta a su forma, pasan de irregulares a perfectamente circulares, tal vez derivados estos de calderas de volcanes ya no activos. En muchos de estos lagos confluyen **ríos,** que contribuyen a alimentarlos de **metano líquido** (y etano). Sin embargo, algunas

depresiones, en vez de ser invadidas por el metano líquido, están secas, lo que evidencia la posible naturaleza temporal y estacional de estas formaciones. En todo caso, gracias a estos descubrimientos, Titán es, junto con la Tierra, el único cuerpo del Sistema Solar que tiene un ciclo hidrológico completo, pero donde lo que se condensa no es el agua, sino, justamente, el metano. Metano que en verano se evapora completamente, o casi, mientras que en invierno llena las depresiones gracias a las precipitaciones y, quizá, a la interacción en la superficie del estrato subterráneo de hidrocarburos.

Basándose en el número y la extensión de estas vastas cuencas de metano y etano, algunos científicos han estimado que las reservas de hidrocarburos que atesora la superficie de Titán ascienden a varios centenares de veces las de petróleo y gas natural conocidas en nuestro planeta. En la práctica, en Titán no hay necesidad de gasolineras: ¡basta detenerse, recoger un poco de metano de un charco y... depósito lleno, y sin pagar impuestos especiales! Es como vivir en Kuwait... solo que los hidrocarburos ya están disponibles en la superficie en vez de en el subsuelo.

Habréis entendido que desde el punto de vista del astroturista Titán ofrece, sin ninguna duda, una gran cantidad de atracciones, siempre que estemos dispuestos a recibir un aguacero de metano (sí, en efecto, es una contradicción... pero «metaguacero» no existe en ningún diccionario terrestre, al menos por ahora). Por tanto, paraguas y gabardina para las excursiones a las regiones de los lagos —en efecto, en algunas zonas, vista desde arriba, la superficie de Titán no es muy distinta de la de Finlandia—, y, si no podéis renunciar a practicar alguna actividad deportiva, entonces llevaos una tabla de surf, porque los mares y los lagos de metano son acariciados por brisas, pero a menudo también por vientos fuertes capaces de levantar olas que darían envidia al célebre North Shore de la isla de Oahu, en el archipiélago de las Hawái.

En cualquier caso, tampoco la corteza sólida es menos interesante que la superficie líquida del satélite. Podemos trepar a las montañas, atravesar amplias extensiones de dunas arenosas —que también contienen materiales orgánicos, como las tolinas (el término *tholin* fue ideado en 1979 por el astrofísico y divulgador Carl Sagan [1934-1996] para describir las moléculas orgánicas prebióticas)— y de vez en cuando toparnos (quizá) con algunos **criovolcanes,** «volcanes fríos» capaces de eructar agua, amoníaco y otras sustancias, que se congelan al instante en contacto con la superficie fría del satélite. Si, además de estar interesados en los paisajes salvajes e incontaminados de esta luna, alimentáis también algún interés

científico, en particular por la astrobiología, sabed que os encontráis en la superficie de un verdadero laboratorio natural de química prebiótica, si bien con unas condiciones de temperatura totalmente diferentes de las de nuestro planeta, por lo que, quizá, podríais descubrir alguna bacteria extremófila alienígena. ¡Imaginad la emoción!

Desde la superficie de Titán no es fácil ver Saturno, pese a estar relativamente cerca, porque la densa atmósfera del satélite permite una visibilidad extremadamente reducida (es como si siempre hubiera una niebla densa e impenetrable). Este mismo hecho impide ver directamente desde el espacio la superficie de la Luna, que se ha podido estudiar solo gracias a los radares y, justamente, al aterrizaje de la sonda *Huygens*. Y, de todos modos, considerando que Titán, como la mayor parte de los satélites de Saturno, orbita prácticamente sobre el mismo plano que los anillos, estos están siempre dispuestos de lado y, por tanto, son invisibles.

También Titán, como la Luna, gira de manera sincrónica, es decir, tiene el período de rotación igual que el de revolución (unos 16 días), por lo que vuelve siempre el mismo hemisferio hacia el planeta. Otros satélites tienen, en cambio, períodos de rotación y períodos de revolución en resonancias diversas (no 1:1, como Titán, justamente), como hemos visto en el caso de Mercurio, o en resonancias orbitales recíprocas, como, por ejemplo, la de Hiperión precisamente con Titán: mientras Titán realiza cuatro órbitas en torno a Saturno, Hiperión completa exactamente tres, o sea, sus períodos orbitales son en resonancia 4:3.

Antes de concluir la excursión a Titán, en general los guías más expertos llevan a los astroturistas a visitar el punto de aterrizaje de *Huygens,* donde aún es posible ver los restos de la sonda. En caso de que no se os propusiera, pedid este breve desvío del recorrido: en general basta una pequeña propina para que accedan a llevaros a este «memorial de la exploración espacial», donde los guías más veteranos se emocionan contando el largo y difícil descenso de la sonda a través de la densa y turbulenta atmósfera de Titán.

LOS GÉISERES DE ENCÉLADO

Si después de haber visitado Titán tenéis tiempo para otra excursión, la sugerencia inmediata es dirigirse hacia **Encélado,** descubierto por el astrónomo alemán nacionalizado inglés William Herschel (1738-1822), padre del ya citado John, que lo observó el 28 de agosto de 1789. Apenas sexto en dimensión entre los satélites más grandes de Saturno, si fuera apoyado sobre Italia, Encélado cubriría apenas la

distancia entre Florencia y Nápoles, 500 kilómetros. En resumen, un enano, del tamaño de apenas un quinto de Titán. Pero este pequeño cuerpo celeste tiene una rara cualidad: es uno de los únicos cuatro cuerpos del Sistema Solar donde se han encontrado con certeza volcanes activos (los otros son la Tierra, obviamente, el satélite de Júpiter Ío y Tritón, un satélite de Neptuno).

Lo extraño es que, dado su escaso tamaño, Encélado no debería ser más que una bolita helada, salpicada de cráteres como la Luna. En cambio, cuando la sonda estadounidense *Voyager 2* se acercó a él en 1981, las fotos que envió a la Tierra revelaron que la zona en torno al polo sur era lisa y luminosa como un prado después de una buena nevada, lo que explicaba por qué Encélado era el cuerpo más blanco del Sistema Solar.

Pero ¿de dónde llega la nieve que en Encélado ha ocultado los cráteres que circundan el polo sur? Desde luego, no del cielo: la temperatura superficial del satélite es de –200 ˚C y su atmósfera es casi inexistente, razón por la cual no hay ninguna posibilidad de ver nubes cargadas de nieve cayendo sobre este satélite. El misterio fue resuelto por la sonda *Cassini,* gracias a una serie de pasadas a corta distancia de Encélado que la llevaron casi a rozarlo a apenas 25 kilómetros de altura. Las fotos enviadas por *Cassini* dejaron boquiabiertos a los planetólogos: desde el polo sur del pequeño satélite se alzaban unos poderosos **géiseres** que lanzaban violentos chorros de materia a alturas tres veces superiores a todo el diámetro del satélite. Pero ¿chorros de qué? La respuesta la ofreció una vez más la sonda, que incluso pasó a través de una de las salpicaduras para analizarla: eran chorros de agua helada y vapor, pero que también contenían dióxido de carbono, metano y otros hidrocarburos y amoníaco.

Por tanto, bajo la superficie helada de Encélado debe de haber un mar subterráneo que bulle y erupciona por grietas de la corteza de 130 kilómetros de longitud y 2 de ancho, fantasiosamente llamadas **rayas de tigre,** en el punto donde esta es más sutil, cerca del polo sur, precisamente. Vista la presencia de sustancias orgánicas y calor, quizá en aquel mar podrían nadar incluso criaturas vivas. El descubrimiento de los géiseres del satélite explicaba a los astrónomos también qué había formado el **anillo E** de Saturno, el más exterior de los muchos que rodean el gran planeta. En efecto, el anillo E está compuesto por una tenue niebla de cristales de hielo, y Encélado orbita precisamente en medio de ellos: debieron de ser las salpicaduras continuas de hielo del pequeño satélite las que crearon la estela en la que hoy navega.

Resuelto el misterio de los géiseres y del anillo, se planteaba otro:

¿qué proporcionaba a Encélado tanta energía, equivalente a la de 15 grandes centrales eléctricas, para conseguir que se funda el hielo y el agua salpique fuera como una tetera en ebullición? En la Tierra el calor que alimenta los volcanes procede de un núcleo de hierro incandescente, calentado por los elementos radiactivos que contiene. Pero en un satélite pequeño, como Encélado, un minúsculo núcleo de metales fundidos se habría enfriado ya desde hace mucho tiempo. Lo que explica el calor es muy probablemente la danza que el satélite ejecuta con el otro satélite, Dione, con el cual tiene una resonancia orbital en relación 2:1, y en parte con Saturno. En efecto, Dione, más alejado del planeta, emplea el doble de tiempo que Encélado en completar una órbita, y también una rotación, dado que son sincrónicas. Por tanto, Encélado se aleja y se acerca periódicamente de Saturno, recorriendo su propia órbita ligeramente elíptica a una velocidad vertiginosa para completarla en menos de 33 horas. Prácticamente un momento, si lo comparamos con el período orbital de nuestra Luna, que emplea cerca de un mes en girar en torno a la Tierra. La fricción provocada por estos continuos tira y afloja gravitatorios con Dione y con Saturno calienta el interior de Encélado, como un alambre doblado y enderezado varias veces. El calor disuelve la capa más exterior del hielo que compone casi enteramente Encélado, formando el mar sepultado, los géiseres y las nevadas que han alisado la superficie del satélite y creado el anillo más exterior de Saturno. Y, quizá, también ha permitido que algún misterioso animalito enceladiano naciera y nadara en aquellas aguas oscuras.

Para el astroturista apasionado por los fenómenos geotérmicos, como los géiseres islandeses o los del parque estadounidense de Yellowstone, la visita a los de Encélado es absolutamente ineludible, también porque, a diferencia de lo que ocurre en nuestro planeta, sobre la superficie de Encélado recae solo una parte del agua y el hielo expulsados por el chorro, mientras que la otra parte es dispersada en el espacio (a causa de la baja gravedad del satélite), formando justamente el tenue anillo E, que se extiende a lo largo de toda la órbita del satélite.

Si mientras os encontráis observando los chorros las condiciones de luz son favorables, el espectáculo resultará aún más vistoso gracias a los juegos de color de los arcoíris creados por los cristales de hielo que recaen sobre el satélite. El Sol está lejos, y aunque su luz es débil, es capaz de iluminar el espectáculo bajo nuestros ojos (siempre que nos hallemos, obviamente, en el hemisferio diurno del satélite).

HIPERIÓN, EL REINO DEL CAOS

Después de Titán y Encélado, las guías astroturísticas tradicionales abundan en sugerencias de excursiones hacia otros satélites mayores, sin duda interesantes pero no tanto como la meta que os proponemos nosotros, un «plato fuerte» para verdaderos entendidos: estamos hablando del satélite **Hiperión,** que, a pesar de llevar el nombre de un titán, es en realidad muy pequeño y también de forma irregular. Como ya hemos anticipado, Hiperión, al ser la luna en órbita más cercana a Titán, se ve afectada por su atracción gravitatoria, hasta el punto de que es bloqueado en una resonancia orbital. La densidad, muy baja —casi la mitad de la del agua—, hace suponer que está esencialmente compuesto por hielo de agua, pero que también es muy poroso, por lo que no son muchas las compañías turísticas que proponen excursiones con aterrizajes sobre su superficie, pues requieren maniobras muy complejas y delicadas, también porque la superficie está completamente salpicada por cráteres de impacto y no siempre es fácil encontrar un sitio donde aparcar el módulo estelar.

Todo esto podría quizá convencernos de que Hiperión no es una meta especialmente interesante. Pero si está recogida en esta guía es porque es una luna realmente especial: el movimiento de rotación de Hiperión es caótico, por lo que no es posible definir con precisión ni cuáles son los polos del satélite ni cuál es su hipotético ecuador (siempre que se pueda definir el ecuador de una roca oblonga y de forma irregular). Ahora bien, dicho así, puede no causar mucha impresión, pero si revelamos que en Hiperión es prácticamente imposible prever cuándo y de qué parte surgirá el Sol en el horizonte o se decidirá a ponerse, entonces quizá os daréis cuenta de la particularidad de la situación. En otras palabras, a causa de esta **rotación caótica,** un hipotético habitante de Hiperión nunca habría podido desarrollar un calendario como el nuestro, basado precisamente en la periódica y regular alternancia del día y la noche.

Por lo que sabemos, Hiperión no comparte esta peculiaridad con ningún otro cuerpo del Sistema Solar. De momento, es el único objeto que tiene un comportamiento caótico. Entendéis que la visita a una luna tan especial no podía faltar en vuestro diario de viaje, ¿verdad?

«EFECTO MARIPOSA»

¿Pero qué significa exactamente «rotación caótica»? ¿Por qué se habla de caos cuando hay de por medio leyes bien conocidas, como las de la física clásica y de la gravitación universal? ¿Qué hace imposible prever con precisión el comportamiento de un sistema aparentemente sencillo como el de Hiperión en órbita alrededor de Saturno?

Para entenderlo, es bueno empezar por el principio, cuando nació

la ciencia del caos. Habréis oído citar la frase: «¿El aleteo de una mariposa en Brasil puede producir un tornado en Texas?». Quien la usó, como título de una intervención en un congreso, en 1972, fue el matemático y meteorólogo estadounidense Edward Lorenz (1917-2008), al que se le puede considerar el padre de la teoría del caos. Es precisamente a él a quien se debe la expresión **«efecto mariposa»,** según el cual en el origen de fenómenos meteorológicos violentos como un tornado podría estar el simple aleteo de una mariposa, lo más ligero y delicado que somos capaces de imaginar.

La respuesta a la pregunta que daba título a la intervención era naturalmente afirmativa, y derivaba de las simulaciones por ordenador de la evolución temporal de un sistema atmosférico. En efecto, sorprendentemente, Lorenz, que trabajaba desde 1963 en sus modelos de atmósfera, había descubierto un hecho que revolucionaría el estudio de los sistemas dinámicos complejos: partiendo de dos capas iniciales incluso solo ligeramente diferentes, un sistema puede seguir profundas evoluciones temporales hasta volverse esencialmente imprevisible, a pesar de que las leyes que regulan su movimiento sean exactas y conocidas. En otras palabras, para decirlo con Lorenz, «fenómenos modestos que se producen a pequeña escala, como el aleteo de una mariposa, pueden inducir transformaciones de inmenso alcance y notable intensidad a gran escala, como el desarrollo de un tornado. De hecho, pequeñas turbulencias microscópicas pueden determinar grandes mutaciones macroscópicas, mientras que simples acontecimientos dinámicos circunscritos pueden originar procesos extraordinariamente complejos e imponentes». Fue así como nació la expresión «efecto mariposa» y quedaron sentadas las bases de una nueva ciencia: la **teoría del caos.**

Pero ¿de qué trata esta nueva disciplina? De un poco de todo, podríamos responder. En efecto, es el intento de comprender si, en comportamientos o movimientos aparentemente casuales y desordenados (como el goteo de un grifo, o la aperiodicidad del latido cardíaco o, precisamente, la rotación de Hiperión), se ocultan reglas o leyes dinámicas muy precisas. Y su objetivo es entender hasta qué punto somos capaces de anticipar la evolución temporal de un sistema complejo, como nuestra atmósfera, por ejemplo, y descubrir su eventual tendencia a volverse caótico, o sea, a transformarse de manera tal de que resulte imposible hacer previsiones a largo plazo sobre su estado futuro.

La ciencia del caos está solo aparentemente alejada de la vida cotidiana. Todo lo contrario. Interpretada como ciencia que estudia los grandes efectos provocados por las pequeñas causas, podemos

aplicarla en innumerables campos: de los movimientos bursátiles al desarrollo de un grupo social, del estudio de ciertas reacciones químicas a la evolución de un sistema biológico. Hasta llegar al nacimiento de la vida y al origen del Universo.

Pensándolo bien, el descubrimiento de la ciencia del caos solo ha sido un redescubrimiento. Medio en serio, medio en broma, el filósofo y matemático francés Blaise Pascal (1623-1662) dijo un día que «si la nariz de Cleopatra hubiera sido más corta, toda la faz de la Tierra habría cambiado». Pero todos tenemos a veces la sensación de que un pequeño cambio, un detalle minúsculo e insignificante, puede ofrecer un resultado completamente distinto, hasta variar radicalmente la historia de un pueblo o de toda la humanidad. Así lo recoge precisamente la sabiduría popular en una antigua canción infantil, en la que por culpa de un clavo perdido en la herradura de un caballo un rey pierde una batalla y, con ella, el propio reino.

Es lo que técnicamente se llama «dependencia sensible de las condiciones iniciales». Se puede experimentar, por ejemplo, en una mesa de billar. Coged una bola, golpeadla fuerte contra la banda y seguid su trayectoria, anotando los puntos donde se producen los diferentes rebotes (tal vez resulte útil hacer un vídeo para estar más seguros). Marcad luego el punto en que se detiene. Ahora volved a coger la misma bola, ponedla de nuevo en el punto de partida y golpeadla nuevamente, tratando de imprimir la misma intensidad que antes y dirigiéndola hacia el mismo punto, como habéis hecho en la anterior tirada. En seguida os daréis cuenta, incluso después del segundo rebote, de que, por más cuidado que pongáis en replicar con exactitud las mismas condiciones experimentales del primer golpe, la bola seguirá inexorablemente una trayectoria completamente distinta, y cada vez más divergente que la anterior en cada rebote, hasta terminar su carrera en un punto que con extrema improbabilidad será el mismo en que se había detenido con anterioridad. En la práctica, incluso una pequeñísima —en realidad, infinitesimal— variación respecto de las condiciones de partida precedentes lleva a la bola a seguir una trayectoria completamente distinta. Sin embargo, las leyes seguidas por la bola son de sobra conocidas. Lo que falta es el conocimiento exacto de las condiciones de partida (y este conocimiento, por desgracia, tiene límites insuperables).

Este es el significado de esa extraña expresión que encabezaba este apartado. Ahora entendéis perfectamente cómo una rotación o una órbita de un planeta o de un satélite pueden «divergir» de ser ordenadas y periódicas y convertirse en caóticas e imprevisibles. Basta solo una pequeñísima variación del eje de rotación o una casi

imperceptible desviación de la trayectoria orbital normal —como una perturbación gravitatoria causada por el paso cercano de otro cuerpo, o incluso por un impacto— para que el orden se transforme en caos.

Entonces ¿cómo se puede saber si un sistema manifestará o no un comportamiento caótico? Quien ideó el principal método de análisis de un sistema físico complejo fue el matemático y físico francés Jules-Henri Poincaré (1854-1912), que a finales del siglo xix lidiaba con un problema en absoluto irrelevante: estudiar la estabilidad del Sistema Solar. Sí, ¡porque no es obvio que todo este conjunto de planetas y satélites deba mantenerse en un movimiento ordenado por un tiempo infinito!

La idea de Poincaré fue dar una valoración cualitativa a través de los instrumentos de la geometría, inventando el «espacio de las fases», un espacio matemático imaginario que representa todos los estados posibles del sistema dinámico. Poincaré no consiguió demostrar si la Tierra antes o después habría escapado de la propia órbita, a pesar de lo cual en 1889 el rey de Suecia Óscar II quiso concederle el premio internacional expresamente instituido como reconocimiento al valor de sus investigaciones.

Y es cierto que desde aquel momento los sistemas dinámicos se estudian analizando las «curvas» que construyen en el espacio de las fases durante su evolución. Según el tipo de movimiento, periódico, atenuado o caótico, el sistema diseña formas distintas en el espacio de las fases: puntos fijos, curvas o superficies regulares y zonas irregulares. Estas toman el nombre de **atractores,** precisamente porque el movimiento es «atraído» hacia ellas. En otras palabras, en un tiempo más o menos largo, la evolución dinámica del sistema se desarrollará en trayectorias descritas en el espacio de las fases de estos atractores. Por ejemplo, un péndulo ideal oscila periódicamente sin detenerse nunca, describiendo en el espacio las fases de una simple elipse. Por otra parte, para un péndulo real, cuyo movimiento es atenuado por las fricciones y la resistencia al aire hasta que queda detenido en su posición de equilibrio, esa misma elipse se estrechará cada vez más hasta convertirse en un punto, donde se detendrá. Esto es: ese punto en el espacio de las fases representa precisamente el atractor del movimiento del péndulo atenuado. Por tanto, el atractor es una generalización de la noción de equilibrio.

También los movimientos de sistemas caóticos tienen sus atractores. Aunque, como tienen propiedades muy particulares, se los denomina «atractores extraños». Y es que estos atractores tienen una estructura fractal, o sea, disfrutan de dos propiedades geométricas muy especiales. La primera es la invariancia de escala (conocida

también como «autosimilitud»): en otras palabras, cada pequeña porción de ella puede ser vista como una reproducción a escala reducida de toda la figura. En la práctica, la estructura de un atractor extraño observada con mucho aumento es la réplica exacta de la observada con poco aumento.

La segunda propiedad es que no tienen dimensión entera, sino fraccionaria (pues sí, existen también las dimensiones fraccionarias). En efecto, cuando en geometría hablamos de dimensiones, pensamos siempre en números enteros: una recta tiene una dimensión; un rectángulo, dos; un cubo, tres, y así sucesivamente. Pero, como hizo el matemático polaco nacionalizado francés Benoît Mandelbrot (1924-2010), es posible extender el concepto de dimensión y descubrir que existen figuras geométricas con dimensión fraccionaria, llamadas «fractales». Los atractores extraños son, por tanto, figuras fractales, cuyas dimensiones pueden ser tranquilamente dadas por un número incluido entre 1 y 2 o entre 2 y 3, etc.

La geometría de los fractales, cuyo origen se sitúa en el nacimiento de los ordenadores (Mandelbrot trabajaba en la IBM), además de encontrar aplicaciones en la dinámica de los sistemas complejos, tiene otros empleos interesantes en el estudio de la naturaleza. Por ejemplo, las costas, las montañas, las nubes, las hojas de un helecho y las ramificaciones de los árboles pueden ser considerados típicos fractales naturales (como demostración de que la naturaleza habla en «lenguaje matemático», como sostenía Galileo). Pero también el cuerpo humano es rico en ejemplos: los bronquiolos pulmonares, las vellosidades intestinales, los capilares del sistema circulatorio, las neuronas y las circunvoluciones cerebrales presentan todos, a distintos niveles, un cierto grado de autosimilitud. Hay también quien supone que el universo tiene geometría fractal, toda una convulsión en el entorno de los cosmólogos. Tal vez la historia de nuestro universo debería ser escrita otra vez de principio a fin.

Y mientras estáis inmersos en estas reflexiones, os daréis cuenta de que se ha hecho tarde —¡como es fácil intuir, en Hiperión no es una cuestión baladí estar muy pendiente del paso del tiempo!— y que debéis volver a vuestro astrobús para reanudar el viaje.

CAPÍTULO 7

URANO, EL PLANETA QUE RUEDA

URANO

PLANETA

Descubrimiento: William Herschel
Fecha del descubrimiento: 13 de marzo de 1781
Masa: 14,54 veces la masa de la Tierra
Radio medio: 50.532 km
Temperatura efectiva: –205 °C
Duración del día: 0,72 días terrestres (rotación retrógrada)
Duración del año: 84,011 años terrestres
Número de satélites: 27 (confirmados)
Posee sistema de anillos planetarios: sí

Quien compra un billete para ir a la Luna, o para visitar los planetas del Sistema Solar conocidos desde la antigüedad, en general tiene ya una idea de lo que quiere ver. Y las agencias especializadas en astroturismo, que han proliferado desde que los viajes interplanetarios se han hecho más económicos y, por tanto, al alcance de un amplio público, ofrecen paquetes y servicios para todos los gustos y bolsillos con destino en estas metas seleccionadas.

En efecto, han terminado los tiempos en que los primeros turistas privados estaban dispuestos a pagar sumas inalcanzables para la mayoría de las personas con tal de asegurarse un asiento en una cápsula espacial, como hizo el ingeniero y empresario estadounidense Dennis Tito, que en 2001 adquirió el primer y carísimo «billete de astroturista» de la historia tras comprarle a la agencia espacial rusa Roscosmos un asiento en la nave *Soyuz* que se dirigía a la Estación Espacial Internacional (ISS).

En esa época, el viaje de ida y vuelta de Tito, incluyendo una estancia de ocho días en órbita alrededor de la Tierra como miembro

de la tripulación de la ISS, costó 20 millones de dólares.

Pero muchos están fascinados también por los viajes hacia lo ignoto, por las metas desconocidas y los lugares inexplorados. Para estos nuevos Ulises, el planeta que garantiza la justa dosis de misterio a un coste aún asumible es Urano. Es un planeta que tiene, sin duda, mucho potencial desde el punto de vista del turismo espacial pero que aún no está muy explotado, a pesar de que reúne características que lo hacen extremadamente interesante, siempre y cuando se quiera emprender un viaje interplanetario que puede durar incluso algunos años y se disponga de un sincero y fuerte espíritu aventurero, porque Urano —y gran parte de lo que seguirá de aquí en adelante— no es precisamente hospitalario: frío, ventoso, oscuro e incluso maloliente.

¡Pero esto es lo mínimo que se puede esperar de un planeta que ni siquiera tiene ganas de que lo descubran!

EL PLANETA NUNCA VISTO... POR EL OJO HUMANO

Así es: uno de los aspectos curiosos de Urano, al menos desde el punto de vista del observador terrestre, es que nadie, en la antigüedad, se había dado cuenta de su existencia. Sin embargo, y aun en los límites de nuestra agudeza visual, es visible por el ojo humano. Además, hace milenios tampoco existía el problema de la contaminación lumínica causada por la iluminación artificial que perturbase la observación del cielo, que, también en las ciudades, era sin duda mucho más oscuro que el actual.

El hecho es que, a pesar de que alguien seguramente lo vio y tal vez lo registró en su cuaderno de observaciones, hubo que esperar a la segunda mitad del siglo xviii para que nos diéramos cuenta de que el Sistema Solar no terminaba con la órbita de Saturno, sino que continuaba mucho más allá. Un estupor no solo para los astrónomos, ciertamente, sino también para los astrólogos, que hasta entonces habían diseñado sus horóscopos basándose solo en los planetas conocidos y omitiendo, por tanto, rasgos del carácter y la personalidad de los sujetos cuya carta astral —o sea, la configuración del cielo en el momento del nacimiento— calculaban. Quizá no sea casual que en la canción *Cuccurucucù* el célebre cantautor siciliano Franco Battiato recite el verso «... ¡tenía ya la Luna y Urano en Leo!». Si el descubrimiento de Urano (y luego de Neptuno, y aun de Plutón, inicialmente considerado un planeta pero posteriormente degradado a la condición de «planeta enano») obligó a los astrólogos a aferrarse a un clavo ardiendo para justificar —¡es un decir!— sus previsiones, basadas en un Sistema Solar incompleto, para los astrónomos fue, en cambio, un gran éxito de la tecnología y una demostración de la

voluntad y la capacidad humanas de superar siempre los propios límites de conocimiento.

Uno de los aspectos más curiosos del descubrimiento de Urano es que lo realizó un músico, como si fuese una demostración de que la clasificación medieval de las disciplinas de estudio tenía un fundamento. En efecto, en la Edad Media las artes liberales eran consideradas propedéuticas al estudio de la teología, la disciplina por excelencia porque permitía «acercarse» a la comprensión de Dios, y se las dividía en Trivio (gramática, retórica y dialéctica, o sea, las materias literarias) y Cuadrivio (las materias científicas: aritmética, geometría, astronomía y, sí, música). William Herschel (1738-1822), alemán de Hannover aunque luego nacionalizado inglés, era un discreto músico cuando, en un determinado momento de su vida, mientras se encontraba en Bath, se percató de que tenía una gran pasión por la astronomía. Entonces empezó a fabricar telescopios, de los que elaboraba tanto las ópticas como las monturas. Comenzó con los más pequeños para pasar a otros cada vez más grandes, hasta que llegó a construir instrumentos con aberturas y dimensiones muy respetables para aquella época. Consiguió vender algunos de estos telescopios, considerados entre los mejores en circulación, financiando así la construcción de instrumentos cada vez más precisos. Para ayudarlo en el estudio de la bóveda celeste, como asistente, estaba su hermana Caroline (1750-1848), cantante lírica y luego también autodidacta y autora, como su hermano, de algunas importantes investigaciones astronómicas, como el descubrimiento de algunos cometas y la observación y catalogación de estrellas dobles, cúmulos estelares y nebulosas.

Urano apareció por primera vez en la lente del telescopio de Herschel el 13 de marzo de 1781, fecha en que anotó que había vislumbrado un objeto extraño, distinto de una estrella y que tal vez fuese un cometa. Sin embargo, en los días siguientes, el objeto no mostró ninguna cabellera, ni menos aún una cola, sino que se desplazó respecto del fondo de las estrellas. Señal de que era realmente algo extraño. Se entendía también que, aunque se desplazaba, no era un cometa por la órbita que estaba recorriendo, demasiado poco excéntrica respecto de la de los cometas. Además, a la vista, aparecía como un pequeño disco, tal como aparecen los demás planetas observados en el telescopio. ¿Qué podía ser, pues, sino un nuevo planeta, desconocido hasta entonces? Y era un planeta.

William Herschel, que durante mucho tiempo pensó que había observado un cometa, comunicó sus observaciones a la Royal Society y refirió su descubrimiento a Jorge III, rey, por entonces, de

Inglaterra. El monarca se quedó tan impresionado que decidió nombrar a Herschel «Astrónomo del Rey», cargo expresamente creado para él, y a su hermana Caroline, su asistente, además de trasladarlos desde Bath, donde vivían, hasta Windsor, donde se alza el célebre castillo real, y asignarles a ambos un salario por sus servicios (al margen de estudiar el cielo, William y Caroline tenían el cometido de entretener a los huéspedes del rey mostrándoles el cielo en el telescopio). En todo caso, desde aquel momento pudieron dedicarse por completo a sus investigaciones astronómicas. Por suerte, porque sus actuaciones musicales ya no eran especialmente apreciadas por el público, de modo que decidieron abandonarlas por completo en 1782.

Naturalmente, el descubrimiento de Urano llevó a William a recibir primero el prestigioso nombramiento como miembro de la Royal Society y luego el de primer presidente de la Royal Astronomical Society, fundada en 1820. Pero también Caroline Herschel obtuvo varios reconocimientos y privilegios, entre otros el de ser la primera mujer que recibía un salario como científica (aunque su sueldo era la mitad del de su hermano). Pero no quedó ahí: fue también la primera mujer que publicó sus investigaciones en las revistas científicas de entonces, que ganó la medalla de oro de la Royal Astronomical Society, en 1828, e, incluso, que fue nombrada miembro honorario de esa misma sociedad, en 1835, la primera mujer que fue distinguida con este título, simultáneamente con la matemática escocesa Mary Somerville (1780-1872).

Gracias a la renta vitalicia asignada por el rey, además de la financiación para la construcción de un gran telescopio reflector, Herschel fabricó algunos de los instrumentos más potentes de la época, que le permitieron nuevos descubrimientos, como el de los dos satélites de Urano, Titania y Oberón, en 1787, y, dos años después, el de los satélites de Saturno Mimas y Encélado, que ya conocemos. En honor a su mecenas, Herschel había propuesto llamar el nuevo planeta Georgium Sidus, «astro de Jorge», un poco como hizo Galileo con sus satélites mediceos (a los cuales se les dieron, de todos modos, nombres provenientes de la mitología grecorromana). Pero evidentemente la época de ese tipo de demostraciones había pasado. Así que, después de un debate en el que estuvieron implicados muchos astrónomos de diversas nacionalidades, el astrónomo Johann Bode (1747-1826) resolvió la cuestión de una vez por todas proponiendo bautizar a los astros siguiendo la estela de la tradición, o sea, centrándose en la mitología. Y llegados a este punto resultó del todo natural llamar al planeta Urano: en la mitología griega, Urano es el padre de Cronos (Saturno), que, como sabemos, es a su vez el padre de Zeus (Júpiter).

Pero, curiosamente, en vez de atribuirle el nombre latino de la divinidad, Cielo, se optó por el griego, Urano, caso único entre todos los planetas del Sistema Solar.

EL COLOR Y... EL OLOR

Pese a su lejanía y, en consecuencia, a la dificultad que entraña observarlo, Urano ha sido muy estudiado también por los telescopios terrestres y por el telescopio espacial *Hubble* (Hubble Space Telescope), pero la mayor parte de las informaciones recogidas sobre el planeta han sido obtenidas por la sonda de la NASA *Voyager 2,* que, después de haber sobrevolado Júpiter en 1979 y Saturno en 1981 —completando las observaciones de la sonda gemela *Voyager 1*—, se dirigió hacia el planeta, que alcanzó en 1986. Sobrevolando Urano, la sonda se acercó hasta los 81.500 kilómetros de la superficie del planeta y recogió imágenes y datos durante seis horas para luego alejarse definitivamente (su siguiente meta fue Neptuno, al que llegó en 1989, y aún hoy gran parte de lo que sabemos de estos dos planetas lo debemos precisamente a los *fly-by* de la *Voyager 2)*. También por este motivo, no son aún muchas las agencias de viajes interplanetarios que proponen este destino, sin duda aventurero pero no carente de riesgos, precisamente por el escaso conocimiento del planeta y de su ambiente circundante.

Mientras os acercáis al planeta, desde las ventanillas de vuestro astrobús os percataréis de que la parte superior de la atmósfera —la que es visible también desde la Tierra— es de un bonito **color verde-azul,** prácticamente uniforme. En efecto, por más que los vientos circulen rápidamente también a gran altura —a varios centenares de kilómetros por hora, mientras que el planeta rueda sobre sí mismo en poco más de 17 horas—, no son particularmente evidentes las franjas coloreadas que hacen abigarrado, en cambio, el aspecto de Júpiter y en parte de Saturno, al margen del llamado **Collar sur,** una franja brillante de color blanquecino que envuelve el polo sur del planeta. En general, los casquetes polares son más brillantes que las zonas ecuatoriales, surcadas por franjas más oscuras.

Después de todo, Urano está aún más lejos del Sol, y el clima general del planeta se ve afectado, sin duda, por la menor cantidad de radiación solar que llega a esta distancia. Sin embargo, en períodos largos y en condiciones específicas se observan algunos cambios estacionales, como tormentas de grandes dimensiones, entre ellas la Uranus Dark Spot, la **Mancha Oscura** de Urano (observada por primera vez por el telescopio espacial *Hubble* en 2006). Además, se pueden admirar algunas nubes brillantes, de un color blanco que

destaca sobre el fondo coloreado del planeta, e incluso **auroras polares,** que, a diferencia de lo que ocurre en los otros planetas, en Urano se manifiestan en todas las latitudes y no solo en los polos. Esto demuestra que Urano posee un campo magnético muy particular y aún no bien comprendido (otro motivo por el que es preciso mantenerse alerta al acercarse al planeta), completamente fuera de eje respecto de la rotación del planeta e incluso descentrado, hecho que hace pensar que no es originado por el núcleo, como ocurre con los otros planetas, sino en capas más cercanas a la superficie.

El color que exhibe el planeta se debe a la abundante presencia de metano (cuya molécula absorbe el componente rojo de la radiación solar mientras difunde la verde y azul), a la que se añaden amoníaco y agua. Son estas tres moléculas, y más específicamente sus «hielos», los que confieren este aspecto a la superficie visible del planeta; y también, si se diera el caso de que quisierais oler la atmósfera, lo que la hace extremadamente maloliente, además de, naturalmente, irrespirable, en el sentido literal del término.

SIDEWAYS PLANET

El lector atento se habrá percatado de que poco antes hemos hablado de cambios estacionales. Es precisamente así: también Urano tiene estaciones. Pero no esperéis que se parezcan a las de nuestro planeta o a las de Marte. Porque en Urano hay varios motivos que hacen el paso de las estaciones mucho más extremo. Ante todo, la distancia del planeta del Sol, que hace que Urano complete una órbita en 84 años terrestres. No muchos seres humanos llegarían a completar todo un «año uraniano». Pero hay otro aspecto que hace las estaciones de Urano verdaderamente especiales: el hecho de que el planeta tiene el eje de rotación inclinado casi 98° respecto del plano de la órbita. En otras palabras, el planeta se mueve en el espacio apoyado de costado —de ahí el apodo de *sideways planet* que le asignaron los astrónomos anglosajones— y parece «rodar» sobre su órbita. Una condición única en el Sistema Solar y fuente de muchas disquisiciones entre los planetólogos, que se preguntan cómo puede haber llegado a esta configuración. Un impacto con otro cuerpo de grandes dimensiones o dos impactos seguidos a poca distancia el uno del otro, quién sabe. El hecho es que Urano está recostado sobre su propia órbita y esto altera de manera significativa también el modo en que podemos observarlo desde la Tierra con el paso del tiempo.

Intentemos imaginar que nos hallamos en su superficie, por ejemplo en uno de los dos polos. Aquí, durante mucho tiempo, en lo que llamaremos primavera y verano, estaríamos orientados

directamente hacia el Sol, con la estrella justo encima de nuestras cabezas (cosa que en la Tierra ocurre en las regiones situadas entre los trópicos). Pero, a diferencia de lo que sucede en nuestro planeta, donde cada estación dura tres meses, aquí, en Urano, ¡las estaciones duran 21 años! En la práctica, un hipotético habitante de un polo de Urano tendría el Sol altísimo sobre el horizonte durante muchos años, mientras que los hipotéticos habitantes de las zonas ecuatoriales lo verían apenas surgir y ponerse cada ocho horas y media. Conforme avanzase el año uraniano, el planeta expondría las zonas ecuatoriales —que en ese punto verían el Sol surcando el cielo cada día, un poco como ocurre en las regiones próximas a nuestro ecuador— y luego las del polo opuesto, que ha estado sumido en la oscuridad y el frío durante 42 años, en una noche aparentemente sin fin.

Por tanto, la combinación del movimiento orbital y la acusada inclinación del eje de rotación da como resultado estaciones larguísimas y, en consecuencia, condiciones climáticas extremas. A eso se añade el hecho de que, observado desde la Tierra, el planeta a veces ofrece a la vista durante muchos años alternativamente un polo y luego el otro, lo que hace bastante complicado comprender las dinámicas de la atmósfera en su conjunto.

HIELO SUPERIÓNICO

No, no es un arma especial de algún robot japonés, como la alabarda espacial o el mazo perforante. El **hielo superiónico** existe de verdad y, a pesar de que su nombre es en realidad muy poco conocido, es quizá la forma más difundida de agua en el Sistema Solar, ¡por no decir que incluso en el universo! Sorprendente, ¿verdad? En efecto, cuando oímos la palabra «hielo», pensamos en los diversos modos en que se presenta en nuestro planeta, desde los cubitos de hielo en el congelador hasta el granizo o los copos de nieve, pasando por los glaciares o los icebergs: en la práctica, agua en estado sólido, que en general se alcanza cuando, en condiciones de presión atmosférica estándar (1 atmósfera), la temperatura baja de los 0 °C. Es la que los físicos llaman «una transición de fase», de la fase líquida, obviamente, a la sólida.

Probablemente hayáis oído decir que los esquimales tienen varias palabras para designar la nieve. En parte es una leyenda urbana, pero en parte también una verdad: depende esencialmente de qué entienden los lingüistas por «palabra», porque en las diversas lenguas esquimales —no existe una sola— muchas palabras compuestas se obtienen combinando los términos a partir de la raíz del concepto básico, y así, de las raíces de la palabra «nieve», se obtienen palabras

traducibles por expresiones complejas como «nieve en el aire», «nieve en el suelo», «suaves copos de nieve que caen», «cúmulo de nieve», «nieve para construir iglús», y así sucesivamente.

Ahora bien, si en el caso de la nieve de los esquimales se trata de establecer por convención qué consideramos «palabra», lo mismo ocurre con el hielo de los físicos. En efecto, el hielo de agua común es un sólido cristalino transparente, menos denso que el agua en fase líquida (este es el motivo por el que flota) y frío al tacto, obviamente. Es difícil imaginar que existan hielos de agua negros, o calientes, o negros y calientes. Sin embargo, existen, y el hielo superiónico es precisamente uno de ellos. Es más, los físicos clasifican exactamente el hielo superiónico como «hielo XVIII», dando a entender que existen al menos otros diecisiete tipos de hielo de agua. En la práctica, los múltiples modos en que se presenta el hielo de agua que encontráis en nuestro planeta, como la nieve, el granizo, los cubitos en los cócteles y los icebergs, están compuestos solo de «hielo I», esto es, de la variante más común, la constituida por cristales de forma hexagonal, conocida como «hielo Ih» («h» significa «hexagonal»; la otra variante, de estructura cristalina cúbica, está presente solo en la atmósfera superior, y es definida como «hielo Ic»). Todos los demás tipos de hielo han sido producidos en laboratorio, en diversas condiciones de temperatura y de presión. Un inciso para los aficionados a la literatura de ciencia ficción: ¡el «Hielo-nueve» de la homónima novela de Kurt Vonnegut no tiene nada que ver con el «hielo IX» de los físicos!

El «hielo XVIII» es, justamente, uno de ellos, y pesar de que fue previsto teóricamente hace más de treinta años gracias a las simulaciones por ordenador del italiano Pierfranco Demontis, no fue producido en laboratorio hasta una época reciente (en 2018). Además, como hemos dicho, al ser negro, en vez de transparente, y caliente, en vez de frío, como esperaríamos de una sustancia helada, tiene una estructura cristalina muy distinta de la del hielo común, es decir, el «hielo I», y de la del resto de hielos, del II al XVII: mientras que en estas fases la molécula de agua, compuesta por un átomo de oxígeno ligado a dos átomos de hidrógeno (de ahí la fórmula H_2O), está intacta, en el «hielo XVIII» se observa una situación completamente diferente: los átomos de oxígeno están dispuestos a lo largo de una retícula cúbica (con un átomo de oxígeno situado también en el centro de cada cara del cubo), mientras que los átomos (o, mejor, los núcleos) de hidrógeno son libres de moverse a lo largo de esta retícula. Una condición, esta, que hace que el «hielo XVIII» se parezca a un metal, aunque en los metales los que son libres de moverse a lo largo de la retícula son los electrones, y no los átomos de hidrógeno.

En esta retícula, los núcleos de hidrógeno están cargados positivamente (¡después de todo son simples protones!), mientras que las nubes electrónicas permanecen centradas en torno a los átomos de oxígeno, que tienen, por tanto, carga negativa (no en vano el atributo de «superiónico» deriva del hecho de que todos los átomos de la retícula tienen una carga eléctrica).

Así, en esta extraña condición, el agua —que es en parte sólida (la retícula rígida de átomos de oxígeno) y en parte líquida (el mar de núcleos de hidrógeno libres de correr)— es también un conductor de electricidad, ¡como si realmente fuera un metal!

LOS GIGANTES DE HIELO

En este punto, los lectores podrían formularse una pregunta espontánea: pero ¿qué tiene que ver todo este razonamiento con Urano? En los textos de astronomía se lee a menudo que Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno son clasificados como gigantes gaseosos. En cierto sentido la clasificación es correcta, porque efectivamente, a diferencia de los planetas llamados terrestres —Mercurio, Venus y Marte, además de la Tierra, obviamente—, que tienen una corteza sólida en la superficie, estos están envueltos por una espesísima capa de gas, y solo muy en el interior encontramos las sustancias que los componen en estado líquido o sólido. Sin embargo, estudiándolos bien, se descubre que en realidad Urano y Neptuno son muy diferentes de Júpiter y Saturno. Aunque de grandes dimensiones en comparación con los planetas terrestres, Urano y Neptuno tienen una composición química distinta y son significativamente menos masivos que los gigantes gaseosos propiamente dichos. Esto hace posible que en su interior se den condiciones de presión y temperatura muy distintas y, por tanto, se creen materiales diferentes del hidrógeno metálico que hemos encontrado en Júpiter, por ejemplo. Esto hizo sospechar seriamente a los astrónomos que, bajando a las capas más internas de Urano y Neptuno, se podía constatar algún extraño cambio de estado, en concreto para el agua, pero también para el amoníaco y el metano.

Con el descubrimiento de que el hielo superiónico existe de verdad y no es solo fruto de una simulación por ordenador, y considerando que los modelos de estructura interna de Urano y Neptuno prevén que a una determinada profundidad se constaten precisamente las condiciones de presión necesarias para producirlo, muchos planetólogos sostienen ahora que el enigma de la composición de esos planetas puede quedar definitivamente resuelto. En la práctica, bajo las espesas capas gaseosas, deberíamos hallar, en un cierto punto, un estrato líquido y luego, aún más abajo, pero sin un verdadero límite

entre una capa y otra, una capa de hielo superiónico, es decir, un poco sólido y un poco líquido, que ocuparía gran parte del volumen de los planetas. En el centro, por último, debería encontrarse un núcleo rocoso.

Queda, naturalmente, la duda de si el hielo superiónico puede formarse también en presencia de una mezcla con amoníaco y metano (el creado en laboratorio es obviamente hielo de agua puro), pero entre tanto se ha dado un paso importante para la comprensión de estos planetas, que ahora se prefiere clasificar como **gigantes helados** o gigantes de hielo y no simplemente como gaseosos. En líneas generales, esta denominación se aplica a un tipo de planeta gigante compuesto principalmente por agua, metano y amoníaco, que son moléculas menos volátiles que el hidrógeno y el helio (de los que, en cambio, están esencialmente compuestos los gigantes gaseosos, llamados también «planetas jovianos»), pero más ligeras que las rocas (silicatos, en los que es rica la corteza terrestre) y que los metales (como hierro y níquel, que, en cambio, se encuentran en el núcleo de la Tierra). El hecho es que, como ocurre también en otras circunstancias, los científicos se divierten subvirtiendo el sentido común y llamando «hielos» a mezclas líquidas o sólidas densas y calientes —a causa de las altas presiones— como estas. Por extensión, a veces, los planetólogos llaman directamente «hielos» a sustancias como agua, metano, amoníaco y otras moléculas de peso intermedio, independientemente de la fase —líquida, sólida o una combinación de ambas— en que se presentan en el interior del planeta.

Muchos astrónomos piensan que este hielo especial no solo es prerrogativa de los dos gigantes helados del Sistema Solar (¡aunque ya así se convertiría, en cualquier caso, en la forma de agua más extendida en nuestro sistema planetario!), sino que también está presente en otros sistemas planetarios extrasolares, donde precisamente los gigantes helados constituyen una clase muy amplia de planetas. Un motivo más para tratar de profundizar en el conocimiento de Urano y Neptuno, que son los gigantes helados más cercanos a nosotros y, por tanto, más fáciles de estudiar (es un decir...); aunque por desgracia, de momento, las agencias espaciales no parecen interesadas en organizar misiones de estudio de estos planetas.

UN EXTRAÑO MAGNETISMO

El hielo superiónico podría ser también la solución al problema del extraño **campo magnético** al que hemos aludido antes. De hecho lo produciría el mar de núcleos de hidrógeno, o sea, de protones, en

movimiento en el interior de la retícula sólida de átomos de oxígeno. Las corrientes eléctricas generadas por este movimiento estarían, en consecuencia, en el origen de un campo magnético completamente diferente de los dipolares —o sea, con un polo norte y un polo sur magnéticos bien definidos y no alejados de los polos geográficos de los planetas— observados en el resto de los planetas del Sistema Solar. En efecto, en estos últimos el campo magnético es generado por el llamado «efecto dinamo», o sea, por las corrientes producidas por las capas fluidas profundas arrastradas por la rotación del planeta. El campo magnético de la Tierra es un ejemplo de ello. Urano y Neptuno tienen, en cambio, campos magnéticos muy densos y complejos, con polos magnéticos muy distantes de los geográficos y, en consecuencia, totalmente fuera de eje respecto de su rotación. No puede generarlos, pues, una dinamo o, al menos, no una dinamo tradicional como la terrestre.

Es entonces cuando el hielo superiónico y su capacidad de conducir corriente acuden al rescate de los planetólogos: para crear el campo magnético de los gigantes helados debe de haber con toda probabilidad una capa de fluido conductor no demasiado profunda, capaz de producir el campo y los fenómenos magnéticos observados en la superficie de los planetas helados. ¿Qué otra cosa sino las capas de «hielo XVIII» podría ser más adecuada para ello? Queda así explicado también el origen de las curiosas **auroras polares uranianas,** observadas en todas las latitudes, mientras que en los otros planetas se verifican solo en las proximidades de las regiones polares.

¿TAMBIÉN ANILLOS?

Al pasar cerca de Júpiter, hemos descubierto que Saturno no es el único planeta del Sistema Solar que tiene anillos. En efecto, tampoco Urano y Neptuno podían menos que tener un sistema de anillos propio.

Los **anillos de Urano** fueron descubiertos casi por casualidad. Era el 10 de marzo de 1977 y el planeta estaba a punto de ocultar una estrella (la ocultación es el paso de un planeta delante de una estrella). El objetivo del experimento era estudiar la atmósfera de Urano durante la desaparición y la reaparición de la estrella desde detrás del planeta, pero la luz estelar «centelleó» varias veces antes de la ocultación propiamente dicha (y también después, de manera simétrica). No hizo falta demasiado tiempo para que los investigadores comprendieran que la luz de la estrella había sido repetidamente bloqueada por un conjunto de anillos estrechos.

Dos años después fue el turno del tenue sistema de Júpiter, visible solamente en las fotografías tomadas por la sonda *Voyager 1,* mientras que los de Neptuno fueron nuevamente descubiertos con el método de las ocultaciones estelares y confirmados «visualmente» por la sonda *Voyager 2* en su paso a corta distancia del planeta en 1989. Observados desde la Tierra, los anillos de Neptuno aparecían únicamente como débiles arcos. Solo gracias a las imágenes de la *Voyager 2* se descubrió, en cambio, que los anillos eran unas circunferencias completas y que los «arcos» vistos desde la Tierra eran solamente condensaciones más brillantes de materia.

A algunos investigadores se les ocurrió la idea de buscarlos también en torno a los demás planetas, pero sin resultado. Por ejemplo, se buscaron en torno a Marte, empleando el telescopio espacial *Hubble*. La idea que se han formado los astrónomos es que la ausencia de un gran número de pequeños satélites en torno a los planetas interiores muy probablemente esté relacionada con la ausencia de anillos. Quizá sea este el motivo por el que, en nuestro sistema planetario, solo los gigantes gaseosos —rodeados por cortejos de satélites de las más variadas dimensiones— tienen anillos. Sin embargo, esta hipótesis ha quedado desmentida parcialmente por la observación reciente de anillos también en torno a dos asteroides (Cariclo y Quirón) y a un sistema enano (Haumea, que tiene asimismo dos satélites).

También en el caso de Urano, algunos satélites originarios podrían haber sido aniquilados por recíprocas colisiones, o bien, como hemos comentado al hablar de Saturno, podrían haberse acercado demasiado al planeta y, en consecuencia, haber sido destruidos por los efectos de marea generados por su misma gravedad y haber acabado así formando los anillos. Recordemos que la distancia mínima a la que un cuerpo de ciertas dimensiones puede orbitar sin daños para su integridad lleva el nombre de «límite de Roche», por el matemático francés que fue pionero en el estudio de sus características. Un satélite de medianas dimensiones, como la Luna, en cambio, en órbita a la debida distancia de la Tierra —o sea, más allá del límite de Roche de la Tierra—, puede mantenerse intacto.

Sin embargo, el origen de los anillos, con independencia del planeta en torno al que se encuentren, aún es objeto de debate. Entre otras cosas, como los astronautas han tenido ocasión de advertir cuando los han sobrevolado, los únicos anillos realmente muy brillantes son los de Saturno, pues los anillos de Júpiter son más oscuros y rojos mientras que los de Urano y Neptuno son prácticamente incoloros y muy oscuros. Es más, las observaciones científicas demuestran que el material del que están compuestos los anillos de Urano es oscuro

como el carbón. Son datos, todos ellos, que sugieren distintas modalidades evolutivas y, quizá, orígenes diferentes.

En cuanto a su aspecto, los anillos de Urano no son muy distintos de los de Júpiter, pero, a diferencia de estos, están compuestos por fragmentos de dimensiones bastante grandes (algunos metros), mezclados con un polvo muy fino. En total, en la actualidad se reconocen trece anillos. De los diez anillos interiores, todos muy estrechos —tienen un ancho máximo de pocos kilómetros—, el más brillante es el más externo. Los dos anillos exteriores, que no fueron descubiertos hasta 2005 gracias al telescopio espacial *Hubble* y mucho más lejos del planeta, son, en cambio, más anchos y también coloreados. El interior muestra un color rojizo, mientras que el exterior es azul, dato que hace suponer una composición a base de hielo de agua. Los fragmentos de hielo provendrían de la superficie de una luna que orbita en las proximidades del anillo.

El descubrimiento de los anillos de Urano —los primeros que fueron detectados después de los de Saturno— fue muy importante porque demostró que no eran una peculiaridad de Saturno, sino que podían ser una característica común a otros planetas. La prueba, como antes decíamos, llegó con el descubrimiento del sistema de Júpiter y, más tarde, con la observación de los de Neptuno.

Pero ¿los anillos duran para siempre? Por desgracia, la respuesta es no. Más aún, podríamos decir que la época en que vivimos ha coincidido con la afortunada circunstancia de que podamos observar los anillos en torno a algunos planetas del Sistema Solar. Porque lo cierto es que las numerosas y continuas colisiones en el interior de los anillos planetarios disipan energía, además de consumir los detritos y hacerlos cada vez más pequeños, lo que induce a pensar que los anillos no tendrán una vida infinita, aunque sistemas especialmente masivos como el de Saturno pueden sin duda durar mucho tiempo. De todos modos, no temáis, tenéis tiempo para organizar vuestro crucero con toda calma: ¡también los anillos de Urano y Neptuno, aunque menos espectaculares, estarán allí esperándoos!

TEATRO, ¡QUÉ PASIÓN!

Hemos visto que dar nombre a los astros en cuanto son descubiertos nunca ha sido sencillo. Ahora, afortunadamente, la Unión Astronómica Internacional ha establecido algunas reglas, pero en el pasado los nombres se imponían y difundían de distintas maneras, y no siempre, como ocurrió con Urano, el encargado de bautizar al astro era su descubridor.

Durante mucho tiempo, el número de planetas y satélites fue

bastante limitado, y aunque el foro de los dioses del Olimpo, de sus parientes, amigos y conocidos, incluso mortales, sea muy amplio, llega un momento en que empiezan a escasear. De todos modos, a pesar de que la mitología griega —trasladada luego a la mitología romana— es sumamente rica en personajes, entre mayores, menores e incluso simples comparsas, no siempre se ha pensado en recurrir a ella, pese a que aún había varias divinidades disponibles para ceder su nombre a algún cuerpo celeste.

Fue así como los primeros satélites de Urano, descubiertos también por Herschel en 1787, tomaron el nombre de dos personajes de las comedias de William Shakespeare (1564-1616): **Titania** y **Oberón,** reina y rey, respectivamente, de las hadas en la obra teatral *Sueño de una noche de verano*. Fue el propio Herschel quien propuso que los satélites de Urano fueran bautizados con nombres tomados de las obras de dos poetas ingleses: Shakespeare, justamente, y Alexander Pope (1688-1744), en particular de su poema «El rizo robado». Siguiendo su propuesta, también los siguientes dos satélites, descubiertos en 1851 por el astrónomo inglés William Lassell (1799-1880), recibieron los nombres de **Ariel** y **Umbriel,** precisamente dos personajes del poema de Pope (en realidad, el nombre de Ariel aparece también en *La tempestad* de Shakespeare). Estos dos nombres fueron nuevamente sugeridos por John Herschel, hijo de William, como sabemos, a petición de su descubridor. Para descubrir el quinto satélite mayor del planeta hubo que esperar, en cambio, a 1948, cuando el astrónomo holandés Gerard Peter Kuiper (1905-1973) observó por primera vez **Miranda,** otro personaje de *La tempestad*.

Ahora el cortejo de satélites de Urano ha llegado a reunir 27 miembros, y todos sus nombres respetan la voluntad de Herschel. Por tanto, en torno al gigante de hielo encontramos lunas de nombres tan curiosos como célebres: Cordelia, Ofelia, Crésida, Desdémona, Julieta, y así sucesivamente. Algunos de ellos —como Cordelia y Ofelia, por ejemplo— son también satélites pastores de anillos. Un efecto psicológico que conviene tener en cuenta es que, llegados a cierto punto de nuestro viaje, sobrevolando un «personaje shakespeariano», nos podríamos ver dominados por la extraña idea de empezar a declamar el monólogo de *Hamlet*. Si os ocurriera, escuchad los consejos de vuestro guía (perfectamente adiestrado para afrontar situaciones de este tipo): en un primer momento vuestros compañeros de aventura podrían incluso apreciarlo, pero no os paséis. Porque, a esa distancia, la sensación de extrañamiento descrita tantas veces por la ciencia ficción, acentuada por la clausura y la nostalgia de casa,

podría hacerse sentir... ¡y basta un instante para transformar a un tranquilo pasajero en un despiadado asesino de actores improvisados!

Los cinco satélites mayores son, de todos modos, los más fascinantes y, por tanto, merecedores de una visita o, incluso, de una breve parada. Desde sus superficies se disfruta de una vista del planeta realmente espléndida. Mucho menos espectacular es, en cambio, la vista de los anillos, cuyo aspecto espectral —recordemos que son grises y oscuros—, sumado al hecho de que son sutiles y poco espesos, los hace muy difíciles de observar: tened en cuenta que satélites y anillos orbitan en el mismo plano, por lo que se ven esencialmente de lado. En la práctica, moverse por el sistema de Urano es como visitar un Saturno más frío, más oscuro y más sombrío, pero no por eso menos interesante. También porque, sin el adiestramiento necesario para afrontar la aventura de Urano, no se puede afrontar ninguna otra aventura, empezando por la que nos lleva al último planeta del Sistema Solar, Neptuno.

CAPÍTULO 8

EL DIOS DEL MAR

NEPTUNO

PLANETA

Descubrimiento: Urbain Le Verrier y Johan Galle
Fecha del descubrimiento: 23 de septiembre de 1846
Masa: 17,15 veces la masa de la Tierra
Radio medio: 49.105 km
Temperatura efectiva: –220 °C
Duración del día: 16,11 horas
Duración del año: 164,88 años terrestres
Número de satélites: 14 (confirmados)
Posee sistema de anillos planetarios: sí

Neptuno es la terminal de todos los cruceros interplanetarios. En efecto, el planeta que lleva el nombre del dios romano del mar es, al menos de momento, el último cuerpo de rango planetario en órbita alrededor del Sol, si los disponemos en orden de distancia de nuestra estrella.

Los astroturistas que se aventuran hasta aquí —a más de 4.500 millones de kilómetros de la Tierra— son aún muy pocos, movidos sobre todo por el deseo de llegar a los confines del Sistema Solar... aunque, de hecho, los verdaderos confines están mucho más lejos.

Pero la vista desde aquí, en cualquier caso, es impresionante. El planeta más cercano, Urano, se halla, en la mejor de las hipótesis, o sea, en el punto de máxima cercanía de las órbitas de los dos planetas, a 1.500 millones de kilómetros de distancia, en la práctica diez veces la distancia que separa la Tierra del Sol. Volviendo la mirada del otro lado encontramos a Plutón, a algún otro planeta enano, pero sobre todo muchas «rocas» de dimensiones diversas —llamadas precisamente, en virtud de su posición, «objetos transneptunianos»— entre las cuales quizá se esconde el tristemente famoso Planeta X, un

planeta que se sospecha que existe pero que aún nadie ha descubierto, a pesar de décadas de observación e investigaciones en esta zona perdida de nuestro sistema planetario. En la práctica, a partir de Neptuno, los espacios entre un cuerpo y otro son enormes; los tiempos orbitales, extremadamente largos, y la luz del Sol, cada vez más débil, aunque, incluso a estas distancias, continúe siendo, con mucho, el objeto más luminoso del cielo.

DESCUBRIMIENTO SOBRE EL PAPEL

Todo astroturista que se precie debe conocer los acontecimientos ligados al descubrimiento de Neptuno: una historia a la vez cautivadora y curiosa, y también con un interesante aspecto geopolítico. Sí, porque en este asunto encontramos a Francia aliada con Alemania... contra Inglaterra, en lo que podríamos considerar un anticipo de la amistad franco-alemana de la Europa contemporánea, reforzada por el recíproco entendimiento en el ámbito de la Unión Europea, también en la gestión del llamado «Brexit» (palabra compuesta obtenida de la expresión *British exit),* el largo, sufrido y accidentado recorrido que en 2021 ha llevado al Reino Unido fuera de la Unión a consecuencia de un referéndum popular celebrado cinco años antes.

Pero volvamos al descubrimiento de Neptuno. Desde el descubrimiento de Urano, los astrónomos se habían dado cuenta de que había algo que no encajaba. Los cálculos sobre su órbita —determinada también recuperando algunas observaciones anteriores a su descubrimiento, en que no había sido reconocido como planeta, sino sencillamente registrado como una estrella fija— daban sistemáticamente resultados diferentes de los deducidos de las observaciones. En la práctica, Urano estaba siempre en un sitio distinto del que le correspondía según los cálculos. Y los cálculos sin duda eran correctos, porque eran los mismos que permitían prever con exactitud las posiciones de todos los demás planetas conocidos.

Después de todo, se trataba de aplicar leyes muy conocidas, como la ley de la gravitación universal, enunciada por Isaac Newton, y verificar que la órbita de Urano respetaba las igualmente famosas tres leyes sobre el movimiento de los planetas, formuladas por Kepler (el ya citado Johannes Kepler) entre 1609, las dos primeras, y 1619, la tercera, cuya demostración —a fuerza de cálculos hechos a mano— ocupó al astrónomo alemán toda una década. Por cierto, Newton llegó a la ley de la gravitación universal precisamente por las leyes de Kepler, para luego demostrar también el teorema inverso, según el cual estas tres leyes son deducibles aplicando justamente la fuerza de

la gravedad y las leyes de la dinámica, descritas en el tratado *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (Principios Matemáticos de la Filosofía Natural)*. El texto, publicado en 1687 por la Royal Society, introducía de manera formal y rigurosa los principios fundamentales de la física clásica (mecánica, hidrodinámica y gravitación, justamente).

A pesar de que las matemáticas y la física aplicadas fueran las correctas, Urano se encontraba siempre un poco más cerca, un poco más lejos, un poco más adelante o un poco más atrás de su órbita respecto del punto calculado. Este hecho hizo suponer en seguida a los astrónomos —gente de ciencia, no de magia— que debía de haber otro cuerpo de dimensiones planetarias, más distante y, por tanto, aún desconocido, que alteraba el movimiento orbital del planeta y cuya atracción gravitatoria actuaba sobre Urano perturbando su órbita. Y alguien empezó a hacer cálculos, con papel y pluma, porque en la época —estamos a mediados del siglo xix— no existían los ordenadores... y ni siquiera las calculadoras de mesa. En concreto, fueron dos los científicos que se empeñaron en descubrir dónde estaba el planeta misterioso, y lo hicieron casi simultáneamente: el matemático francés Urbain Le Verrier, del Observatorio de París, y el matemático inglés John Couch Adams (1819-1892), asistente en el St. John's College de Cambridge (que en su honor ha instituido el Adams Prize, uno de los más importantes premios de matemáticas del Reino Unido).

Adams, un joven recién licenciado y de carácter reservado, tuvo la mala suerte de chocar con el desinterés inicial de sus superiores directos, el astrónomo James Challis (1802-1882), director del Observatorio de Cambridge, y, sobre todo, George Biddell Airy (1801-1892), séptimo astrónomo real, y director del Observatorio Real de Greenwich, que en el curso de su carrera científica acumuló otros numerosos méritos, pero no el de contribuir al descubrimiento de un nuevo planeta. Lo cierto es que los dos se percataron de la importancia de los cálculos de Adams solo después de que llegara la noticia de que en Francia se estaba trabajando en la misma investigación. Pero ya era demasiado tarde. Le Verrier, evidentemente más motivado y emprendedor, dándose cuenta de que sus previsiones sobre el nuevo planeta no parecían interesar a los astrónomos franceses, se dirigió directamente al astrónomo alemán Johann Gottfried Galle (1812-1910), que en esa época trabajaba en el Observatorio de Berlín. A diferencia de los astrónomos ingleses y franceses, el astrónomo alemán tomó muy seriamente en consideración los cálculos de Le Verrier, hasta el punto de que, una

vez recibida la información sobre la posición prevista, Galle, asistido por su discípulo Heinrich Louis d'Arrest (1822-1875), se puso rápidamente a la caza del nuevo planeta.

La carta de Le Verrier llegó en la tarde del 23 de septiembre de 1846, y Galle y D'Arrest se pusieron de inmediato, esa misma noche, a sondear el cielo en torno a la posición prevista por el matemático francés, comparando lo que veían en la lente del telescopio con lo que estaba registrado en los mapas celestes más recientes. Después de media hora de investigaciones, a menos de medio grado de separación angular del punto en que Le Verrier había señalado la posición de Neptuno, hallaron un objeto no indicado en los mapas disponibles. Acababa de pasar la medianoche del 24 de septiembre de 1846. En la noche siguiente encontraron confirmación de su descubrimiento observando que el objeto se había desplazado respecto de la posición anotada en la noche anterior. ¡El planeta previsto por Le Verrier existía de verdad!

Los astrónomos ingleses recibieron el anuncio con un sentimiento de tremenda derrota. Solo después de la oficialización del descubrimiento, Challis se percató de que, en realidad, también él, siguiendo las indicaciones proporcionadas por Adams, había observado Neptuno nada menos que en agosto, sin darse cuenta, no obstante, de que ese era de verdad el planeta que estaba buscando, aunque también es cierto que no disponía de mapas estelares actualizados. A pesar de los intentos iniciales de los ingleses de atribuir los méritos del descubrimiento también a Adams, fue el mismo Adams quien reconoció públicamente, en un documento presentado en la Royal Astronomical Society, que, pese a que sus cálculos eran anteriores a los de Le Verrier, este último los había publicado primero y, por tanto, el descubrimiento debía atribuirse por completo al francés por los cálculos teóricos y a Galle por las observaciones en el telescopio. Un éxito increíble para la teoría de la gravitación universal, que se demostraba capaz de prever la existencia de un planeta basándose simplemente en las observaciones de otro. Aquel mismo año, la Royal Society premió a Le Verrier con la medalla Copley, su premio científico más prestigioso.

Después del descubrimiento de un nuevo cuerpo en el Sistema Solar, los astrónomos se centran generalmente en buscar las denominadas «observaciones predescubrimiento» (o *pre-covery,* contracción de la expresión inglesa *pre-discovery recovery,* o sea, «recuperación predescubrimiento»). El proceso consiste en buscar la imagen de un objeto en tomas o placas fotográficas anteriores a su descubrimiento, básicamente con el objetivo de calcular una órbita

más precisa. Esto ocurre muy a menudo con los planetas menores, pero a veces también un cometa, un planeta enano, un satélite natural o una estrella variable son detectados en viejas imágenes archivadas (recientemente se han obtenido incluso observaciones de predescubrimiento de exoplanetas). Para ser precisos, los astrónomos distinguen también entre *pre-covery,* que alude a una imagen anterior al descubrimiento, y *recovery* [«recuperación»], que, en cambio, se refiere al redescubrimiento de un cuerpo que se había perdido (por ejemplo, porque estaba escondido detrás del Sol) pero que luego vuelve a ser visible (en ocasiones los astrónomos pierden de vista un asteroide o un cometa y luego los vuelven a detectar).

En cualquier caso, lo verdaderamente curioso de la historia del descubrimiento de Neptuno es que el primero que lo observó fue, una vez más, Galileo Galilei, con uno de sus primeros telescopios. La noche del 28 de diciembre de 1612 Galileo está observando Júpiter para estudiar los movimientos de los satélites descubiertos por él pocos años antes. En sus apuntes anota la presencia de una estrella de fondo en las proximidades de Júpiter.

Pasa un mes y el 27 de enero de 1613 el astrónomo pisano vuelve a observar Júpiter y anota de nuevo la presencia de una estrella en el campo de la lente, además de la de los satélites. Por desgracia para Galileo, en aquel momento el movimiento de Neptuno era excepcionalmente lento, por lo que no fue capaz de percatarse de que, en realidad, se desplazaba en el cielo respecto del fondo de las estrellas fijas. Sin embargo, algunos estudiosos estiman que Galileo sí debió de percatarse de que aquel puntito luminoso se había movido ligeramente, pero no existen pruebas definitivas de que fuera consciente de haber descubierto un planeta. Que, para ser reconocido como tal, ha debido esperar más de dos siglos.

MUY BIEN, PERO ¿MERECE LA PENA VISITARLO?

Para los viajeros interplanetarios, la etapa de Neptuno es sinónimo de frontera. Neptuno representa las Columnas de Hércules de nuestro sistema planetario. Todo lo que encontramos más allá —incluido Plutón, que también ha sido considerado un planeta durante más de 70 años— son cuerpos residuales, objetos que tienen su morada en las periferias extremas, con órbitas excéntricas e inclinadas, y muchos de los cuales son restos de materiales provenientes de los orígenes del Sistema Solar. También para la ciencia ficción, como por ejemplo para la película (por otra parte, bastante discutible, tanto por su trama como desde el punto de vista científico) *Ad astra,* firmada por el director estadounidense James Gray en 2019, Neptuno es el planeta en

torno al cual orbita la última avanzadilla habitada por seres humanos.

Después de haber visitado Urano, el astroturista inexperto podría pensar que Neptuno es sencillamente una réplica, solo que más lejana y, por tanto, más difícil de alcanzar. En realidad, aunque no muy distinto en su estructura —también Neptuno es un gigante de hielo, más masivo y denso que Urano, por cierto—, el octavo planeta del Sistema Solar presenta algunas características relevantes absolutamente dignas de ser señaladas. La distancia del Sol se hace sentir en términos de cantidad de energía que llega a la superficie del planeta, representada obviamente por las capas más externas de la atmósfera. No obstante, los intercambios energéticos entre la radiación solar y los gases atmosféricos son suficientes para desencadenar fenómenos meteorológicos y climáticos incluso más significativos que los observados en Urano, aun estando este último mucho más cerca del Sol, como demostró la sonda *Voyager 2* cuando sobrevoló el planeta en 1989, observación que, de momento, es la única realizada a corta distancia de este gigante de hielo.

A diferencia de Urano, que «gira» sobre su propia órbita, Neptuno tiene una inclinación del eje de rotación muy similar a las de la Tierra y de Marte (ligeramente mayor), por lo que se beneficia de evoluciones estacionales más parecidas a las nuestras... ¡si no fuera porque cada estación dura más de 40 años! En efecto, el planeta orbita en torno al Sol en algo menos de 165 años, mientras que gira sobre sí mismo a velocidad bastante sostenida: un día neptuniano dura poco más de 16 horas. La atmósfera de Neptuno es azotada por vientos incluso muy violentos, que viajan a centenares de kilómetros por hora, capaces de producir tormentas de notables dimensiones, como, por ejemplo la **Gran Mancha Oscura,** un óvalo de miles de kilómetros de extensión, de color más oscuro que las regiones circundantes, observado por primera vez precisamente por la sonda *Voyager 2* y luego desaparecido de la vista en las siguientes observaciones realizadas con el Hubble Space Telescope, el único otro instrumento capaz de ofrecer imágenes y datos relevantes sobre los fenómenos atmosféricos que se desarrollan en Neptuno. Junto a aquella, la sonda inmortalizó también otra mancha oscura, más pequeña (denominada Dark Spot 2, **Mancha Oscura 2),** y otra tormenta, constituida, en cambio, por una masa de nubes blancas y brillantes que se mueven a velocidades elevadas, hecho del que derivó el nombre **Scooter** (sí, tal cual, como las motocicletas célebres y difundidas en todo el mundo con la *Vespa* de la compañía Piaggio). Ahora sabemos que en Neptuno se forman continuamente manchas oscuras —se han observado otras a lo largo del tiempo, tanto en el hemisferio septentrional como en el

meridional— y que son zonas de alta presión situadas a más profundidad que las nubes blancas circundantes que acompañan siempre de cerca estas formaciones. El hecho de estar situadas en profundidad les confiere el aspecto oscuro, mientras que las nubes blancas brillantes están constituidas por cristales de metano helado. Manchas oscuras y nubes brillantes son, en todo caso, fenómenos típicos y recurrentes de la atmósfera neptuniana, y es prácticamente seguro que estarán presentes al paso de cualquier astrobús, también porque, aunque no tan duraderas como la Gran Mancha Roja de Júpiter, son estructuras relativamente estables, capaces de persistir incluso durante varios meses.

DE UN BONITO COLOR AZUL GÉLIDO

Cualquiera que simplemente se haya limitado a hojear un folleto turístico de Neptuno habrá advertido su bonito color azul intenso. Pues, en efecto, es uno de los mayores atractivos del planeta: iluminado por la luz solar, el planeta resplandece de un color mucho más brillante y nítido que el pálido aguamarina al que estábamos habituados en la órbita alrededor de Urano. La coloración azul, típica asimismo de los mares de nuestro planeta, podría hacer pensar que también Neptuno está envuelto por un enorme y profundo océano de agua líquida. Pero no es así: a las temperaturas típicas que se encuentran en la superficie del planeta (unos –220 ˚C) el único estado físico en que se puede hallar permanentemente agua es el sólido, o sea, en forma de hielo.

A esta coloración contribuye, una vez más, el metano, que absorbe los componentes del rojo al verde de la radiación solar, reflejando y difundiendo preferentemente la azul. Pero todo esto no deja de entrañar un misterio, porque el porcentaje de metano en la atmósfera de Neptuno es muy similar al encontrado en Urano. Por tanto, debe de operar algún otro mecanismo capaz de modificar aún más la coloración de las capas altas de la atmósfera neptuniana.

Pero el metano en Neptuno (y quizá también en Urano) podría producir un fenómeno increíble, imposible de manifestarse en la Tierra: ¡la lluvia de diamantes! Sí, habéis leído bien, de diamantes. Al principio de los años ochenta del siglo pasado, algunos experimentos realizados con el metano a alta presión demostraron que este podía partirse fácilmente en distintos átomos de carbono y de hidrógeno (recordemos que la molécula de metano está compuesta por un átomo de carbono ligado a cuatro átomos de hidrógeno, como expresa el símbolo CH4). Los átomos de carbono, ya liberados, se ligaban después entre sí para constituir los diamantes, que son una de las

formas en que puede presentarse el carbono, una retícula cristalina compuesta solo por átomos de carbono dispuestos según una estructura tetraédrica. Por cierto, es interesante señalar también que las dos formas más destacadas del carbono representan uno de los materiales más duros, el diamante, precisamente, y uno de los materiales más blandos que se conozca: el grafito.

Ahora bien, según algunos investigadores, las condiciones de presión y temperatura observadas en laboratorio podrían verificarse también en las atmósferas de los gigantes helados, aunque otros muchos lo dudan porque en los planetas el metano no es puro, sino que está mezclado con otras moléculas que podrían alterar los procesos químicos de separación y recombinación de los que resultarían después los diamantes.

El hecho es que la hipótesis de las lluvias de diamantes, además de suscitar cierta fascinación, ayudaría también a explicar algunos mecanismos que operan en las atmósferas de los gigantes helados, como el intercambio de calor entre las capas externas y las más internas y profundas. Naturalmente no es muy seguro encontrarse con una lluvia de diamantes —más similar a una granizada que a una lluvia—, pero, por otra parte, ninguna agencia de cruceros interplanetarios prevé entre las excursiones la inmersión en la atmósfera de Neptuno, considerada, como la de todos los gigantes gaseosos y helados, fuera del alcance de cualquier medio de transporte.

La experiencia de las «zambullidas controladas» de algunas sondas, como la de *Galileo* en la atmósfera de Júpiter (en 2003) o de *Cassini* en la atmósfera de Saturno (en 2017), nos enseña que han sido inexorablemente aplastadas, poco después de adentrarse entre las nubes, por las altas presiones detectadas en las profundidades. Por tanto, si pensabais llevaros a casa un precioso recuerdo de la atmósfera neptuniana, olvidaos: es mejor que os centréis en algo menos costoso, ¡dando por sentado que ninguno de vosotros está dispuesto a sacrificar su vida por un diamante!

LA COMPAÑÍA DE NEPTUNO

Como ocurrió con Urano, no fue fácil ni inmediato decidir qué nombre atribuir al planeta recién descubierto. Le Verrier fue el primero en proponer Neptuno, siguiendo el esquema de atribuir a los planetas nombres de divinidades de la mitología romana. Entre tanto, los ingleses habían propuesto Océano, uno de los titanes, hijos de Urano y Gea (la Tierra). Pero luego, en un alarde de egocentrismo, Le Verrier pensó en atribuirle su propio nombre. Alguien, en Francia, para

justificar esa propuesta, empezó incluso a llamar Herschel al planeta Urano (por el nombre de su descubridor), pero fuera de las fronteras francesas la idea fue objeto, naturalmente, de críticas hostiles. Al final prevaleció el sentido común y la nomenclatura de los planetas, por suerte, continuó siendo coherente, aunque, como sabemos, Urano deriva del nombre de una divinidad griega en vez de romana. Con Neptuno, en cambio, estamos frente al nombre del poderosísimo dios romano del mar, identificado en la mitología griega como Poseidón, también él, como Zeus (Júpiter), hijo de Cronos (Saturno).

No es casual, por tanto, que el principal satélite de Neptuno, identificado pocos días después del anuncio del descubrimiento del planeta, lleve el nombre de Tritón, hijo primogénito de Poseidón. Lo descubrió, el 10 de octubre de 1846, el astrónomo inglés que hemos conocido antes: William Lassell, luego autor de otros relevantes descubrimientos, como el del satélite de Saturno **Hiperión** y el de los satélites de Urano **Ariel** y **Umbriel.**

Tritón es una luna muy respetable, con la particularidad de ser la única, en todo el Sistema Solar, en órbita alrededor del planeta en movimiento retrógrado: en la práctica, se puede decir que Tritón viaja a contramano (pero, de todos modos, en rotación sincrónica, o sea, con la misma duración de una rotación que la de una revolución, equivalente a unos seis días). Cuando la sonda *Voyager 2* la sobrevoló, se topó con un mundo frío y desolado, envuelto en un manto de nitrógeno helado pero con una importante actividad geológica. En efecto, en su superficie se encuentran numerosos **criovolcanes** que escupen nitrógeno líquido y otros compuestos, produciendo también una tenue atmósfera. Por tanto, gran parte de la superficie de Tritón es relativamente joven y pobre en cráteres, porque se reforma continuamente. Con el satélite de Júpiter Ío y con el de Saturno Encélado, Tritón es el único otro cuerpo del Sistema Solar que muestra una evidente actividad volcánica, obviamente excluyendo nuestro planeta.

Algunos astrobiólogos, partiendo de la sospecha de que exista un mar subterráneo, como en Europa, también han supuesto que en Tritón pueden haberse desarrollado formas de vida acuática —en todo caso, profundamente diferentes de las que conocemos—, pero las condiciones ambientales, ya inhóspitas, se han agravado posteriormente por la presencia del campo magnético del planeta, que se cierne sobre el satélite, cuyas características son muy similares a las ya descritas para el campo magnético de Urano.

De todos modos, esta luna merece una excursión, no solo para asistir de cerca a algunas bellas salpicaduras de nitrógeno líquido —

pero, cuidado, ¡los chorros pueden ser muy violentos!— sino también para visitar una región con una estructura geológica única en todo el Sistema Solar: el **terreno rugoso,** muy áspero y recorrido por un denso enredo de relieves y valles. En efecto, en esta extensa zona de Tritón se encuentran diversos cráteres, de algunas decenas de kilómetros de diámetro, pero no parece que su origen se deba a impactos meteóricos. Dado su aspecto regular, parece más bien que se hayan originado por actividades geológicas o volcánicas endógenas, como, por ejemplo, el ascenso a la superficie de materiales más ligeros procedentes de las capas más internas.

Antes de marcharos de Tritón, volveos un instante hacia Neptuno. Porque desde aquí se goza de una vista espléndida y única sobre el planeta (siempre que se aterrice sobre la cara de la luna que da al planeta): observado desde la superficie de Tritón, Neptuno ocupa nada menos que 6° de cielo. En comparación, la Luna, vista desde la Tierra, ocupa apenas medio grado de cielo.

Antes de decidiros por una excursión a esta luna, comprobad que disponéis de la ropa adecuada: con una temperatura media de –240 °C, Tritón es incluso más frío que Plutón (al que se parece mucho, también en su composición, hasta el punto de que los planetólogos suponen que no se formó en las cercanías de Neptuno, sino que más bien fue captado por el planeta) y, con toda probabilidad, ¡uno de los cuerpos más fríos de todo el Sistema Solar!

Además de Tritón, de los 14 satélites conocidos de Neptuno, sin duda hay que citar a **Nereida** —descubierto desde la Tierra en 1949—, el satélite con la órbita más excéntrica de todas las lunas del Sistema Solar, y **Proteo** —descubierto en 1989 por la sonda *Voyager 2*—, más grande que Nereida pero más difícil de observar, ya sea porque orbita muy cerca del planeta, ya porque comparte, junto con el satélite de Marte Fobos y el de Saturno Febe, la no envidiable característica de estar entre los objetos más oscuros de nuestro sistema planetario.

Moviéndoos arriba y abajo del plano orbital de los satélites, podríais percibir también el sistema de **anillos de Neptuno,** que ya hemos conocido hablando del de Urano. En total, los astrónomos han contado al menos cinco anillos principales, a los que han bautizado con los nombres de los cinco científicos que han contribuido al descubrimiento del planeta y de su primer satélite: Galle, Le Verrier, Lassell, Arago y Adams. Pero esperad, ¿también vosotros habéis notado un intruso? A Galle, Le Verrier, Lassell y Adams ya los conocemos, perfecto, pero ¿quién es Arago?

François Arago (1786-1853), en la época en que Le Verrier empezó

a interesarse por Urano, era el director del Observatorio de París —nombrado por el emperador Napoleón Bonaparte en persona— y fue él quien sugirió al matemático que centrara su interés en el problema de las anomalías observadas en la órbita del planeta descubierto por Herschel. Figura relevante en la Francia de la primera mitad del siglo xix, también como político, Arago, además de astronomía, se ocupó de matemáticas y física. Con una pequeña mácula en el currículo cuando, siendo Le Verrier un protegido suyo, defendió firmemente la propuesta de dar el nombre del matemático al planeta recién descubierto. Pero al final la astronomía pone a todos de acuerdo, y ahora los dos franceses orbitan, en forma de anillos, pacíficamente en torno a Neptuno en compañía de un alemán y de dos ingleses. ¡A saber lo que habría pensado D'Arrest!

CAPÍTULO 9

CUERPOS MENORES... ¡PERO MUCHOS!

Hasta hace pocos años, en los libros de astronomía se leía que los planetas del Sistema Solar eran nueve. Pero en 2006 la Unión Astronómica Internacional degradó a Plutón al rango de «planeta enano», de modo que Plutón disfrutó del estatus de planeta solo durante 76 años.

En efecto, fue descubierto en 1930 por el astrónomo estadounidense Clyde Tombaugh (1906-1997), del Lowell Observatory, en Arizona. Y por pura casualidad. La investigación de Tombaugh estaba centrada en algunos cálculos, según los cuales, considerando los movimientos perturbados de Urano y Neptuno, más allá de la órbita de este último debería encontrarse otro planeta. Y aunque se demostró que esos cálculos eran erróneos, el azar quiso que, de todos modos, sí que hubiera un planeta.

El hecho es que ahora, después de ser relegado oficialmente, ya no hay agencias de viajes interplanetarios que organicen cruceros a Plutón. Demasiado lejos, con la órbita demasiado inclinada..., en resumen, demasiado difícil de alcanzar. Y, además, ¿qué podríamos ver?

UN «CORAZÓN» DE HIELO

En cambio, para los aventureros del espacio, Plutón tiene su punto fascinante. Sin embargo, y de momento, el único modo de llegar hasta él es alquilar un monovolumen espacial en Tritón, la luna principal de Neptuno, donde se encuentran los únicos astrofletadores dispuestos a proporcionaros un medio con kilometraje ilimitado —¡en este caso es absolutamente necesario, os lo garantizamos!—, sin excesivos recargos. Si, por ejemplo, se os ocurriera alquilar un monovolumen desde la órbita de Urano hasta Plutón, ¡descubriríais que el coste sería superior al de todo el crucero!

Necesitaríais un guía muy experto, que os pudiera conducir con seguridad por la trayectoria correcta. De otro modo se corre el riesgo de perderse en la periferia extrema del Sistema Solar... donde la luz es tan tenue que no es posible ni siquiera recargar las baterías con paneles solares. A propósito: antes de alquilar el monovolumen, aseguraos de tener el depósito lleno, y también una batería de reserva.

Si al final conseguís acercaros a Plutón, como hizo la sonda de la NASA *New Horizons* [«Nuevos horizontes»], lanzada en 2006 y arribada a su destino en 2015, después de un largo y tortuoso viaje a través del Sistema Solar, veréis desde las ventanillas una extensión característica y superficial en forma de corazón. Los planetólogos han querido llamarla **Tombaugh Regio** en honor del descubridor de este cuerpo remoto. En el interior de esta región se encuentra una zona, prácticamente el «lóbulo occidental» del corazón, denominada **Sputnik Planitia,** naturalmente en honor del *Sputnik 1,* el satélite soviético que orbitó por primera vez, el 4 de octubre de 1957, en torno a nuestro planeta. Formada quizá a causa de un gran impacto, esta estructura debía de ser originariamente un cráter profundo, se cree que parcialmente lleno de agua, primero líquida, luego rápidamente congelada, procedente de las capas interiores del planeta enano. Ahora está totalmente revestida de nitrógeno congelado, como, por otra parte, la mayor parte de la superficie de Plutón. Pero, además del nitrógeno congelado, aquí encontramos también hielos de metano y de dióxido de carbono (el ya citado hielo seco), aparte del hielo de agua. Pero no un hielo de agua como el de nuestro congelador: a estas temperaturas, el hielo de agua es duro y resistente como el acero. En Plutón, con este hielo de agua se han formado verdaderas cadenas montañosas. Si os decidís por una excursión por la superficie, una vez descendáis de vuestro módulo espacial mirad en torno: las montañas que os rodean son verdaderos icebergs, en el sentido literal del término. Solo que alrededor no tienen mar, sino otros tipos de hielo.

Una parte de las sustancias encontradas en forma de hielos en la

superficie se halla también en la sutil atmósfera que envuelve el planeta enano: nitrógeno, metano y dióxido de carbono hacen el aire no solo irrespirable, sino también brumoso. En efecto, en Plutón encontramos una neblina estratificada compuesta por un hollín que transforma la observación del cielo en una experiencia no tan emocionante como debería a juzgar por la «gran oscuridad» en que estamos sumidos. En todo caso, visto desde Plutón, el Sol, aun siendo 1.600 veces menos luminoso respecto a como lo vemos en la Tierra, es, sin embargo, 250 veces más brillante que la Luna llena y, por tanto, no solo lo suficientemente luminoso para superar en brillo a cualquier otro objeto presente en el cielo, ¡sino también difícil de mirar directamente sin ser deslumbrados!

PERO ¿QUÉ HA HECHO MAL?

Al margen de todo, el motivo que impulsó a los astrónomos a «descalificar» a Plutón como planeta era —y es— puramente científico: concierne al origen y la evolución del Sistema Solar. Uno de los requisitos para ser considerado un planeta es que el cuerpo sea dominante en la región de espacio en que orbita, y está ligado al proceso de formación de los planetas, que adquirieron su masa actual captando poco a poco los detritos (los llamados «planetesimales») que se hallaban a lo largo de su camino en torno al Sol. Y si estos requisitos se cumplen en los primeros ocho planetas, que pueden definirse como llegados a su «maduración», no son válidos para Plutón, cuyas inmediaciones están repletas de miríadas de cuerpos menores. Y eso sin contar que su órbita está muy inclinada respecto del plano orbital del resto de planetas y es tan excéntrica que cruza incluso la de Neptuno, lo que la sitúa a veces más cerca del Sol que de este último. Todo esto explica por qué, con gran contrariedad de buena parte de la comunidad astronómica estadounidense —después de todo, ¡Plutón era el único planeta descubierto del otro lado del océano!—, la Unión Astronómica Internacional votó por mayoría para desplazar a Plutón a una nueva categoría de cuerpos del Sistema Solar, precisamente la de los planetas enanos.

Ahora sabemos que Plutón tiene cinco satélites, de los cuales **Caronte,** el primero que fue descubierto, en 1978, es el principal. Es más, la relación entre las dimensiones de Plutón y Caronte (el radio de este último es equivalente a la mitad del radio del planeta enano), además de la notable semejanza de sus características físicas, han hecho pensar que podíamos encontrarnos ante un planeta enano doble más que ante un planeta enano con satélite. Un aspecto importante —también para los astroturistas que quieran aventurarse a realizar una

excursión a Caronte— es que los efectos de marea han bloqueado firmemente los dos cuerpos en una rotación sincrónica recíproca: en la práctica, tanto Plutón como Caronte giran en torno a sus ejes en el mismo tiempo en que ambos orbitan recíprocamente en torno al mismo centro de masas del sistema que —caso raro en el Sistema Solar— se encuentra fuera del cuerpo principal, o sea, de Plutón (puesto que Caronte es especialmente masivo: su masa es equivalente al 12% de la del planeta enano). Así, visto desde la superficie de Plutón, Caronte muestra siempre la misma cara, y, por el contrario, observado desde la superficie de Caronte, Plutón expone siempre el mismo hemisferio. Esto significa que desde algunas zonas de Plutón Caronte es siempre visible mientras que desde otras no lo es nunca. El mismo razonamiento vale a la inversa.

Si queréis un consejo, pedid a vuestro guía que os lleve al hemisferio de Plutón desde el que Caronte es bien visible, porque el espectáculo es de verdad extraordinario. Visto desde la superficie del planeta enano, el satélite ocupa 4 grados angulares de cielo, y en la práctica aparece ocho veces más grande que la Luna llena. No obstante, incluso en el apogeo de su luminosidad, o sea, en la fase de «Caronte lleno», su luz no podría competir nunca con la que ilumina nuestro planeta durante los plenilunios. La distancia del Sol es enorme, de modo que solo una pequeñísima fracción de su radiación llega hasta aquí.

UN PERRO... ¡AMIGO DE UN RATÓN!

Hablando de Plutón no podemos dejar de hablar de Pluto. Sí, de él, el perro fiel compañero de Mickey, uno de los personajes más célebres de la «pandilla Disney». Para entender el vínculo, es preciso saber, ante todo, que Plutón, en inglés, se escribe Pluto. En aquella época, al objeto recién descubierto, pensando que se trataba de un planeta, se le asignó obviamente el nombre de una divinidad romana. En este caso específico, pareció oportuno atribuir al planeta más distante del Sol el nombre de la divinidad de los infiernos, es decir, de ultratumba, que se inspiraba en el dios griego Hades.

Curiosamente, la historia cuenta que quien propuso el nombre de Plutón fue una chiquilla inglesa de 11 años, Venetia Burney (1918-2009), cuya idea, enviada por los astrónomos ingleses a Clyde Tombaugh, gustó mucho a este último, también porque las primeras dos letras del nombre contenían las iniciales de Percival Lowell —el mismo de los canales de Marte—, que fue el primero que sospechó la existencia del planeta. Aunque la veracidad de esta historia ha suscitado las dudas de algunos, es un hecho que Venetia Burney fue

oficialmente acreditada como primera proponente. Y esta fue su única contribución a la ciencia astronómica. Por cierto, también los nombres de los satélites de Plutón **(Nix, Hidra, Cerbero** y **Estigia)** se inspiran en figuras mitológicas ligadas al mito de los muertos: Caronte, famoso por el célebre verso de Dante «Caronte, con los ojos hechos brasa», es justamente el barquero que transporta las almas de los muertos de una ribera a la otra del río Aqueronte para conducirlos a la entrada de los infiernos.

Se da el caso de que precisamente en el otoño de 1930 Walt Disney (1901-1966) había empezado a dar a conocer, en los dibujos animados primero y en los tebeos después, a un perro, una especie de sabueso de color amarillo ocre y con una cola negra larga y sutil. Por cierto que muchos aún hoy se preguntan cómo es posible que Goofy, que también es un perro, pueda tener aspecto antropomorfo y hablar —y convertirse también en un superhéroe comiendo cacahuetes— mientras que Pluto solo puede recurrir a sonidos, gestos y muecas de perro... Pero, ya se sabe, en el mundo de la fantasía todo es posible.

En sus primeras apariciones, el perro se llamaba Rover, pero pronto los autores de los tebeos se dieron cuenta de que era un nombre demasiado difundido y no identificaba bien al personaje. Plutón había sido descubierto pocos meses antes, y quizá bautizar al perro amigo de Mickey como el planeta pareció una idea útil para hacerlo igualmente famoso. Parece que no existen documentos oficiales sobre los orígenes de esta decisión, pero poco importa: desde 1931, Rover se convirtió en Pluto... y así hasta hoy.

A LA CAZA DEL PLANETA X

Inmediatamente después del descubrimiento de Neptuno, los astrónomos empezaron a especular sobre la existencia de un planeta cuya órbita se extendiera más allá de la de Neptuno, detectado en 1846 precisamente gracias a los cálculos sobre las perturbaciones gravitatorias observadas en la órbita de Urano. Fue en aquel momento cuando nació la hipótesis del **Planeta X** (ahora, más correctamente, se lo puede llamar planeta **Nueve),** desarrollada inicialmente por Percival Lowell, como se ha anticipado, que tomó prestado el nombre ya utilizado con anterioridad por el astrónomo francés Gabriel Dallet. Recordemos que el símbolo X no se debía leer como número, sino como letra, símbolo de incógnita. Sin embargo, el posterior descubrimiento de Plutón, en 1930, no descartó completamente la idea de que otros planetas pudieran orbitar en torno al Sol a distancias aún mayores.

El descubrimiento, en tiempos más recientes, de cuerpos

transneptunianos (TNO, del inglés *Trans-Neptunian Object)* de dimensiones planetarias como **Éride (también llamado Eris), Makemake, Haumea, Sedna, Quaoar** y otros, unido a la observación de que muchos de ellos siguen órbitas particulares, explicables si se admite la existencia de un planeta de masa al menos terrestre capaz de producir las anomalías gravitatorias advertidas, ha vuelto a poner en auge la hipótesis del Planeta X. Podemos observar, de paso, que los nombres que acabamos de enumerar revelan la definitiva ampliación de las mitologías a las que recurrir para bautizar los cuerpos del Sistema Solar. Pero en el momento en que escribimos, aún no se tienen evidencias seguras de este planeta. Por esta razón, si en vuestras excursiones queréis ir más allá de Plutón, nada os impide hacerlo, siempre que seáis absolutamente conscientes de que os estáis adentrando en regiones oscuras, no solo porque aquí la luz del Sol es cada vez más débil, sino también porque en realidad están aún en gran parte inexploradas.

¿DE VERDAD FALTA UN PLANETA?

Cuando ya se había descubierto Urano pero aún se desconocía la existencia de Neptuno, a los astrónomos les sorprendía la extraña ausencia de un planeta entre Marte y Júpiter. En efecto, las órbitas de los dos planetas son muy distantes y, según una ley empírica denominada «ley de Titius-Bode» —por el nombre de los dos astrónomos que la enunciaron—, allí en medio debería encontrarse otro cuerpo en órbita alrededor del Sol. Y de hecho ese cuerpo existía, aunque pronto se descubrió que no era el único, es más, que había miles: solo algunos, pocos, son similares a pequeños planetas (de los que deriva también el nombre de «planetoide»), y en cambio muchos otros, la gran mayoría, son esencialmente rocas de diversas formas y dimensiones. En un momento dado, William Herschel propuso denominarlos «asteroides» («similares a una estrella») porque eran tan pequeños que parecían puntiformes vistos en el telescopio, y se decidió llamar **cinturón principal** de asteroides a esa zona del Sistema Solar comprendida entre las órbitas de Marte y Júpiter, que incluye precisamente la mayor parte de estos cuerpos menores, detritos de un planeta que nunca ha nacido a causa de las perturbaciones gravitatorias del gigante gaseoso (¡imaginémonos a Júpiter mostrando su lado malicioso como la divinidad cuyo nombre lleva!).

Con un diámetro apenas inferior a 1.000 kilómetros, **Ceres** —como la célebre marca de cerveza, que toma el nombre de la misma divinidad romana, diosa de la fertilidad y numen tutelar de las

cosechas— es el más grande asteroide en dimensiones del llamado cinturón principal. Ceres es también el asteroide más masivo de la franja, habida cuenta de que contiene cerca del 30% de la masa de todos los demás asteroides juntos. Su descubrimiento se debe al italiano Giuseppe Piazzi (1746-1826), que lo vislumbró casualmente por primera vez en la noche del 1 de enero de 1801 desde el Observatorio de Palermo mientras estaba inmerso en el estudio de la posición de las estrellas de un catálogo. Confundido al principio con una estrella, Ceres fue observado por Piazzi en las noches inmediatamente posteriores, mostrando un evidente movimiento propio respecto de las estrellas del fondo. Fue en ese momento cuando Piazzi pudo anotar en su diario: «La noche del 3 [de enero] mi sospecha se convirtió en certeza, tras haberme asegurado de que no era una estrella fija». Ceres fue considerado durante mucho tiempo un planeta, y como tal permaneció en tablas y libros astronómicos alrededor de medio siglo, hasta que se descubrieron otros planetoides.

El descubridor, Giuseppe Piazzi, nació en el pueblecito lombardo de Ponte in Valtellina. Tras ingresar en la Orden de los Teatinos en 1764, fue ordenado sacerdote en 1769, después de que sus estudios le llevaran también a introducirse en el ámbito de las matemáticas y la astronomía. Al término de un período dedicado a la enseñanza de la filosofía, las matemáticas y la teología dogmática, en 1780 Piazzi obtuvo la concesión para la construcción de un observatorio astronómico en Palermo, que una vez concluido tomó el nombre de Observatorio Nacional del Reino de las Dos Sicilias. Fue precisamente desde este observatorio desde donde Piazzi descubrió a Ceres, al que él mismo dio el nombre de Cerere Ferdinandea, en honor del rey Fernando III de Sicilia, que poco después, en 1816, se convirtió en Fernando I de las Dos Sicilias. En honor al astrónomo italiano, en cambio, el milésimo asteroide descubierto (en 1923) fue bautizado Piazzia.

Entre los cuerpos del cinturón principal, Ceres es uno de los pocos que muestra una forma prácticamente esférica, y se debe al hecho de que su masa es suficiente para «modelarlo» gravitatoriamente: por este motivo la Unión Astronómica Internacional lo promovió al rango de planeta enano, precisamente en la misma reunión en que fue decidida la suerte de Plutón. De modo que, por un lado, Plutón fue degradado mientras que por el otro Ceres fue promovido. Ahora conocemos también otros planetas enanos (los ya citados **Éride, Makemake** y **Haumea,** además obviamente de Plutón), todos descubiertos en tiempos muy recientes, pero Ceres es el único planeta enano del Sistema Solar interior.

Una visita a Ceres representa de verdad unas vacaciones alternativas en comparación con los grandes viajes interplanetarios. Desde aquí tendréis un punto de observación único en el Sistema Solar: mirando hacia el Sol, veréis todo el cortejo de los planetas interiores, mientras que volviendo la mirada del lado opuesto podréis escrutar los amplios espacios del Sistema Solar exterior.

En órbita alrededor del planeta enano encontraréis la sonda *Dawn* [«Alba»] de la NASA, que está allí desde 2015, después de haber visitado el asteroide Vesta, que es —después de la promoción de Ceres a la categoría de planeta enano— el asteroide más grande del cinturón principal. Y si deseáis hacer una visita a un punto en medio del cinturón de los asteroides, no temáis: atravesarlo no es tan peligroso como han hecho creer muchas películas de ciencia ficción, en que parece que pasar por allí es como acabar bajo un bombardeo de piedras, rocas y peñascos de las dimensiones más diversas, todos concentrados en golpear la nave espacial de turno. No es en absoluto así, y lo sabemos porque varias misiones lo han atravesado y no se han cruzado con un solo asteroide en su recorrido; es más, han tenido que ir a buscarlos expresamente para estudiarlos de cerca.

EL CINTURÓN DE KUIPER

Además del cinturón principal, hay otra zona del Sistema Solar particularmente poblada de asteroides (y de cometas): es el cinturón de **Edgeworth-Kuiper** o cinturón de Kuiper, para simplificar, por los nombres de los astrónomos que sospecharon de su existencia, el irlandés Kenneth Edgeworth (1880-1972) y el holandés Gerard Peter Kuiper. Se trata de un ancho anillo que se extiende desde la órbita de Neptuno hasta más allá de 50 unidades astronómicas del Sol (la unidad astronómica es una unidad de medida de las distancias, equivalente a la distancia media Tierra-Sol, unos 150 millones de kilómetros). Como hemos visto, los cuerpos que pueblan esta zona de la periferia de nuestro sistema planetario toman el nombre genérico de «cuerpos transneptunianos» o KBO *(Kuiper Belt Objects,* «objetos del cinturón de Kuiper»).

Si excluimos el sistema Plutón-Caronte, que también es considerado un KBO, el primer objeto transneptuniano, llamado «1992 QB1», fue descubierto en 1992, y la caza de asteroides del cinturón de Kuiper y más allá es uno de los capítulos más atractivos de la investigación actual en el interior del Sistema Solar.

En efecto, es en esta zona donde recientemente se han descubierto cuerpos de forma esférica y de dimensiones comparables a las de Plutón, hasta el punto de que la posición de este último como noveno

planeta del Sistema Solar estaba amenazada desde hacía tiempo; justo hasta el anuncio del descubrimiento del TNO llamado definitivamente **Éride (o Eris),** la diosa griega de la discordia, después de que durante un cierto período hubiese sido oficiosamente bautizado **Xena** (en honor de la princesa guerrera protagonista de una conocida serie televisiva estadounidense). Tiene una órbita fuertemente elíptica, que lo sitúa a casi 100 unidades astronómicas del Sol, y un diámetro ligeramente menor que el de Plutón pero una masa significativamente mayor. A pesar de que sus descubridores habían anunciado que habían hallado el fantasmal Planeta X, fue precisamente este TNO el que obligó a la Unión Astronómica Internacional a establecer una definición de planeta que excluía de hecho a Plutón, al tiempo que transformaba a Éride en el planeta enano más masivo conocido (¡pero no el más grande, por algunas decenas de kilómetros!).

CENTAUROS, PERO SIN MOTOCICLETA[1]

Entre las órbitas de Júpiter y Neptuno existe una restringida población de asteroides (pocos centenares, hasta ahora) cuyas órbitas se entrecruzan con las de los planetas gigantes del Sistema Solar: Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. El primer asteroide observado en esta zona fue **Quirón,** descubierto en 1977. Este cuerpo, que se mueve entre las órbitas de Saturno y Urano, es el prototipo de la clase de asteroides denominados «Centauros», objetos de transición entre el cinturón principal y el de Kuiper. En efecto, hace años, Quirón mostró que, a veces, los límites entre cometa y asteroide son muy difusos: a su paso por el perihelio, en 1988, desarrolló una cabellera de gas y polvo que le valió ser clasificado como cometa periódico. Así que, con un diámetro superior a 150 kilómetros, además de asteroide, Quirón es también uno de los cometas periódicos más masivos conocidos del Sistema Solar, y los astrónomos suponen que dispone también de un sistema de anillos. Precisamente por su naturaleza ambivalente, estos cuerpos derivan su nombre de las criaturas de la mitología griega conocidas como los Centauros, cuyo cuerpo era mitad hombre y mitad caballo.

Hay minicruceros que parten tanto de Titán —por tanto, del sistema de Saturno— como de Titania —en el sistema de Urano—, según la posición recíproca de los planetas con Quirón: una excursión a este objeto seguramente provoca la sensación de ebriedad típica del aterrizaje sobre un cuerpo activo, pero quizá, llegados a ese punto, merece la pena ponerse a la cola para sacar un billete hacia el primer cometa disponible, ¡porque esa sí que es de verdad una excursión alucinante!

¿ANUNCIADOR DE DESGRACIAS?

Hasta hace algunos siglos, el paso de un **cometa** era interpretado como señal premonitoria de desgracias y calamidades. La muerte de un rey o un emperador, el estallido de una guerra, la propagación de una epidemia, así como un terremoto, una inundación o un invierno especialmente severo, estaban entre los posibles acontecimientos anunciados por la observación de un cometa. Motivo de estas creencias era la inexplicabilidad del fenómeno, asociado también a la creencia en la estaticidad, inmutabilidad y perfección de la esfera celeste. La repentina aparición de un cuerpo luminoso y su igualmente misteriosa desaparición, su paso rápido entre las estrellas, su mudable e inhabitual aspecto, su trayectoria, tan diferente de la de los planetas, eran, por tanto, la demostración de que el cielo quería avisar de que algo tremendo estaba a punto de ocurrir a los inermes testigos del extraordinario acontecimiento. Y la desorientación era tal que incluso en los tiempos de Galileo no existía la absoluta certeza de que los cometas fueran fenómenos celestes —como otros curiosos hechos meteorológicos— o terrestres, del tipo de las emanaciones de gas de nuestro planeta.

En 1687, como recordaréis, Newton publicó su tratado *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Curiosamente, a la publicación de ese texto fundamental contribuyó un nombre importantísimo para los expertos en cometas. En efecto, fue Edmond Halley (1656-1742), amigo y profundo admirador de la obra de Newton, quien convenció a este último de que sacara sus folios del cajón y divulgara al mundo sus grandes descubrimientos. Halley había comprendido la enorme importancia que aquellos apuntes, recopilados durante años, adquirirían una vez se hiciesen públicos, y no se equivocaba. La historia cuenta que Halley, en 1705, calculó, precisamente empleando las leyes del movimiento y la gravitación universal formuladas por Newton, que el cometa observado por él y por Newton en 1682 era el mismo que se había dejado ver en 1531 y 1607 y predijo que volvería en 1758. Halley murió sin poder asistir al triunfo de la mecánica y de sus cálculos. Pero el cometa, que volvió a resplandecer en los cielos puntualmente en 1758 (y fue redescubierto por un astrónomo aficionado alemán, a pesar de que era objeto de búsqueda desenfrenada por parte de los astrónomos de toda Europa), lleva desde entonces su nombre: es el cometa de Halley o, mejor, el **cometa Halley.** Su aparición en el período previsto por el astrónomo inglés fue la mejor confirmación de que los cometas, a pesar de sus características tan peculiares, estaban sujetos a la atracción del Sol, exactamente como los planetas, y, como estos, seguían órbitas

elípticas cerradas, aunque más alargadas, que después de un cierto período de tiempo los exponían de nuevo a la vista de los observadores terrestres.

De una sola vez se había resuelto la disputa sobre la naturaleza de los cometas y demostrado la completa fiabilidad de las leyes de Newton en la previsión de los cuerpos celestes. Se abría un nuevo capítulo de la astronomía: la mecánica celeste. Con los métodos proporcionados por esta disciplina, que se ocupa, como dice su nombre, de describir el movimiento de los cuerpos celestes bajo la acción de la recíproca fuerza de atracción debida a la gravedad, ha sido posible calcular el período de revolución del cometa Halley en torno al Sol (unos 76 años) y demostrar que este regresa puntualmente para mantener vivo en nosotros el recuerdo de aquella gran aventura del intelecto humano. El último paso, realmente no muy espectacular, se produjo en 1986. El próximo está previsto para 2061. Y aunque algunos de nosotros no podremos asistir a ese regreso, podemos estar seguros de que volverá a resplandecer una vez más en nuestros cielos.

La tradición de representar la estrella de los Reyes Magos con forma de cometa se debe a Giotto (1267-1337), que, sobre el fondo de la célebre *Adoración de los Magos,* pintada al fresco en la capilla de los Scrovegni en Padua, representó al cometa Halley, observado por él en su paso de 1301. Precisamente en honor del gran pintor toscano, la misión espacial de la Agencia Espacial Europea (ESA) dedicada al estudio del cometa Halley en su paso por el perihelio de 1986 fue llamada *Giotto*.

MENSAJEROS DEL CIELO

Los cometas, a diferencia de la mayoría de los asteroides, tienen generalmente órbitas elípticas muy alargadas, de modo que gran parte de su período de revolución transcurre en las zonas externas del Sistema Solar y se acercan al Sol solo por breves períodos. Esta parece ser, junto a su composición, la principal diferencia entre los asteroides y los cometas, cuya clasificación como cuerpos claramente distintos es objeto de disputas y actualmente controvertida, como demuestra la existencia de Quirón.

Los cometas son cuerpos de dimensiones no muy grandes, frágiles, de forma irregular, compuestos por material no volátil (rocas y granos de polvo) y por gas en estado sólido (congelados). Considerando su elevado contenido en agua y la presencia de materiales orgánicos, muchos astrónomos estiman que los cometas pueden no solo haber contribuido al llenado de los océanos terrestres, sino también haber hecho posible la vida en ellos, o en cualquier caso haberla enriquecido

con elementos y moléculas útiles para que pudiera desarrollarse.

Desde el punto de vista morfológico, los núcleos cometarios tienen formas muy variadas e irregulares, y la dimensión del eje mayor duplica generalmente la del menor. Las dimensiones, muy pequeñas, de estos cuerpos y su escasa capacidad de reflejar la luz del Sol los hacen prácticamente invisibles cuando se encuentran a gran distancia de nuestra estrella. ¿Cómo puede, entonces, un cometa convertirse en el objeto espectacular que todos conocemos hasta el punto de hacerse visible a veces incluso a simple vista? La explicación radica en la interacción entre el material que constituye el núcleo cometario y la radiación solar, que se intensifica a medida que el cometa se acerca a su cita con el Sol. En efecto, el cometa se hace visible solo en el momento en que está bastante cerca de la estrella, de modo que la radiación proveniente de esta empieza a sublimar los gases volátiles del núcleo, que a su vez se arrastran detrás de pequeñas porciones de material sólido del propio núcleo. Recordemos que la sublimación es la transición de fase de sólido a vapor: naftalina y hielo seco —dióxido de carbono sólido— son típicos ejemplos de material sublimante. Los materiales sustraídos al núcleo se expanden en una atmósfera cometaria que puede asumir dimensiones de algunos centenares de miles de kilómetros: la cabellera. Es precisamente la cabellera la que da nombre a este particularísimo tipo de objetos: cometa significa, en griego, «astro con cabellera».

A menudo en los cometas se observan varias colas, de forma y disposición diversas. En general, se pueden clasificar en dos categorías principales: las colas de gas ionizado y las colas de polvo; las primeras, rectas y regulares, siempre en dirección opuesta a la del Sol, y las segundas, curvas y de aspecto irregular (a veces se fragmentan o presentan condensaciones). Las colas representan, sin duda, el aspecto más espectacular del paso de un cometa, también porque pueden alcanzar longitudes de centenares de millones de kilómetros cubriendo así, vistas desde la Tierra, varias decenas de grados de cielo, como hemos observado, por ejemplo, en los pasos por el perihelio del **cometa Hale-Bopp,** en 1997, o del **cometa Neowise,** en 2020.

Los cometas, pues, se consumen. A cada paso a corta distancia del Sol pierden parte del material que los constituye, el cual, formando la cabellera y la cola, se pierde irremediablemente en el espacio interplanetario. Pero este material puede mostrarse en todo su esplendor. Porque son precisamente las partículas y los granos de polvo abandonados por los diversos cometas que pasan cerca de nuestro planeta los que, penetrando en nuestra atmósfera, se manifiestan en otro acontecimiento espectacular: la lluvia de estrellas

fugaces, o mejor de meteoros. Posiblemente la más conocida es la de la noche de san Lorenzo, en torno al 10 de agosto de cada año, cuando la Tierra, recorriendo su propia órbita, se cruza con la de las **Perseidas** (así se llama el enjambre de meteoros originado por el cometa **Swift-Tuttle).** Al cometa Halley se debe, en cambio, la lluvia de las Oriónidas, observable cada año en octubre.

Una vez ha pasado por las proximidades del Sol, el cometa se aleja de nuevo, a veces para siempre, perdiendo rápidamente luminosidad. La cola desaparece y la cabellera se reduce hasta esfumarse. El Sol está tan lejos que su radiación ya no es capaz de sublimar el hielo superficial del núcleo. El cometa ha vuelto a la oscuridad de la que había surgido: el núcleo ahora es un trozo de hielo oscuro que apunta hacia la periferia del Sistema Solar.

BOLAS DE NIEVE SUCIA

El modelo de núcleo cometario, con el tiempo confirmado por las observaciones, fue propuesto por primera vez en 1950 por el astrofísico estadounidense Fred Lawrence Whipple (1906-2004).

Con una expresión inventada por el mismo Whipple, el núcleo de un cometa es descrito elocuentemente, también por los expertos, como una «bola de nieve sucia», constituida por una agrupación de material compuesto en que la cohesión es muy débil: los cometas son muy frágiles, y no es raro observar casos en que pierden trozos voluminosos de núcleo o en que se parten en varios fragmentos, como ha ocurrido, por ejemplo, en el Shoemaker-Levy 9, cuyos fragmentos —se contaron veintiuno, de distintas dimensiones— fueron a impactar en el planeta Júpiter, en 1994. Y con cada paso cerca del Sol, un cometa se va volviendo paulatinamente más frágil, habida cuenta de que son precisamente los materiales volátiles los que dan cohesión al núcleo, que con el tiempo se va haciendo más poroso y, por tanto, más susceptible de sufrir fragmentaciones.

Pero, considerando sus órbitas alargadas y su composición, ¿de dónde vienen los cometas? Una vez establecido que las órbitas de los cometas se desarrollan en torno al Sol, la pertenencia de los astros con cabellera a nuestro sistema planetario está definitivamente clara. El origen de los cometas está ligado, por ende, al del Sol y los planetas de la nebulosa primordial, y existe el convencimiento razonado de que el material que compone los cometas es parte de ese material residual del que se originarían los cuerpos mayores del sistema.

Fue en 1950, año fundamental para el estudio de los cometas, cuando el astrólogo holandés Jan Hendrik Oort (1900-1992) propuso, después de haber desarrollado meticulosos cálculos orbitales, la

existencia de una enorme «nube» esférica que quizá contenía un billón de núcleos cometarios en órbita, con trayectorias casi circulares, mucho más allá de la órbita de Plutón, a una distancia comprendida entre 30.000 unidades astronómicas y un año luz del Sol, pero tal vez incluso más allá. Esta nube, ahora llamada **Nube de Oort,** es probablemente la fuente de todos los cometas de período largo, y también de los que parecen tener órbitas no cerradas. De vez en cuando, bajo la acción perturbadora de alguna estrella (se piensa que la Nube de Oort puede extenderse hasta casi la mitad de la distancia que separa el Sol de la estrella más cercana, **Próxima Centauri,** situada a 4,2 años luz de distancia) o a causa de probables choques entre los diversos objetos que pueblan esa región periférica del sistema planetario, de la nube se separa un fragmento que puede dirigirse hacia el exterior y desaparecer así definitivamente en las tinieblas interestelares o comenzar su largo viaje, que lo llevará, en el curso de los milenios, a las partes interiores del Sistema Solar y a manifestarse como cometa. Y precisamente recorriendo el Sistema Solar puede sufrir esas perturbaciones que pueden modificar su órbita y transformarlo así en un cometa periódico o devolverlo para siempre más allá de donde había venido.

Los astrónomos creen que los fragmentos de materia helada que constituyen la Nube de Oort son precisamente el material residual sobrante de la formación del Sol, los planetas y los satélites. Pero esta consideración, en vez de quitar importancia al descubrimiento, aún lo hace más relevante, precisamente porque los cometas, analizados desde este punto de vista, son testigos remotos del nacimiento de nuestro sistema planetario. Por este motivo, algunos cometas, al igual que varios asteroides, han sido objeto de misiones espaciales, también muy complejas, como la misión de la Agencia Espacial Europea (ESA) denominada *Rosetta,* llamada así porque, como la célebre estela que permitió descodificar la escritura jeroglífica, la sonda espacial debía asumir el papel de interpretar el mensaje sobre los orígenes de nuestro sistema planetario traído justamente por los cometas. Una misión que duró casi 20 años —fue lanzada en 1996 y finalizó en 2016— y durante la cual *Rosetta* estudió de cerca el **cometa Churyumov-Gerasimenko,** sobre cuya superficie incluso llegó a posar una pequeña sonda robótica, el módulo *Philae,* en 2014.

A pesar de que la gravedad sea muy débil y el terreno frágil, aterrizar sobre un cometa es posible, aunque las imágenes a corta distancia recogidas por las distintas misiones han mostrado terrenos extremadamente accidentados. Por no hablar de que cuando el núcleo cometario se activa, o sea, desarrolla la cabellera y luego la cola,

resulta un poco complicado maniobrar entre los distintos chorros de gas y polvos emitidos al espacio.

Otra posible solución para visitar un cometa —una propuesta que ninguna agencia de viajes interplanetarios ha contemplado de momento, ni lo hará nunca— es engancharse a un cometa durante su paso a corta distancia y dejarse arrastrar alrededor de su órbita para explorar a lo largo y a lo ancho el Sistema Solar y quizá aún más allá: si aferramos con una correa el cometa adecuado, este puede llevarnos definitivamente incluso fuera de nuestro sistema planetario. ¡Quizá fuera precisamente este tipo de experiencia el que inspiró los versos de Franco Battiato: «seguimos por instinto las estelas de los cometas, como vanguardias de otro sistema solar»! Pero... «no time, no space»: el tiempo y el espacio disponibles para hablar de lo que, desde el punto de vista astronómico, podemos considerar el «patio de casa» han terminado. Finalmente ha llegado el momento de proyectarse «hasta el infinito... ¡y más allá!», ¡como reza el lema de Buzz Lightyear, protagonista de las películas de la serie *Toy Story*.

---

1 Juego de palabras que alude al modelo Centauro de la marca de motocicletas Guzzi, muy popular en Italia. *[Nota del ed.]*

CAPÍTULO 10

DEL SOL A LAS DEMÁS ESTRELLAS

SOL

ESTRELLA

Edad: 4.567 millones de años
Se volverá gigante roja: en unos 5.500 millones de años desde ahora
Masa (Tierra = 1): 333.000
Diámetro: 1.391.000 km
Rotación: 25,1 días (ecuador), 34,4 días (polos)
Temperatura del núcleo: 16.000.000 °C
Temperatura superficial: 5.500 °C
Composición: hidrógeno, 74,9%; helio, 23,8%
Energía: transforma 400 millones de toneladas de hidrógeno en helio por segundo
Gravedad superficial (Tierra = 1): 28

El viaje a través del Sistema Solar nos ha llevado más allá de Plutón, a una distancia de varios miles de millones de kilómetros de nuestro planeta, que ahora, quizá, podríamos incluso echar de menos.

Pero nosotros, impulsados por una infinita curiosidad, decidimos proseguir nuestro recorrido en busca de nuevos mundos, exactamente igual que la tripulación de la nave espacial *Enterprise* de la serie *Star Trek*. Por otra parte, ¿quién no recuerda la frase que introducía cada episodio? «El espacio, la última frontera. Estos son los viajes de la nave estelar *Enterprise,* durante su misión de cinco años, dirigida a la exploración de nuevos mundos, a la búsqueda de otras formas de vida y de otras civilizaciones, hasta llegar hasta donde ningún hombre ha llegado jamás.»

Pero, antes de dejar nuestro Sistema Solar definitivamente atrás, decidimos echar un último vistazo a la Tierra para ver cómo aparece desde esta distancia, que solo son capaces de alcanzar pocos artefactos

humanos: las dos sondas *Pioneer,* las dos sondas *Voyager* y, naturalmente, la sonda *New Horizons,* todas proyectadas hacia las periferias extremas del Sistema Solar e incluso más allá.

PALE BLUE DOT

Fotografiada desde el espacio, la Tierra parece un «punto azul pálido», *pale blue dot,* en inglés, como fue definida por el astrofísico y divulgador estadounidense Carl Sagan, célebre entre el gran público por haber escrito la novela de ciencia ficción *Contact,* de la que luego se hizo una película de éxito con Jodie Foster como protagonista.

Fue precisamente Sagan quien propuso a la NASA que apuntara la cámara montada a bordo de la sonda *Voyager 1* hacia el interior del Sistema Solar una vez que hubiese terminado su misión principal y se encontrase a gran distancia de nosotros. En efecto, cuando nuestro planeta fue retratado, en los primeros meses de 1990, la sonda se hallaba a más de 6.000 millones de kilómetros de distancia, es decir, mucho más allá de la órbita de Neptuno. La imagen, histórica, muestra un puntito pequeñísimo inmerso en las profundidades del espacio interestelar que, no obstante, contiene toda la humanidad, pasada y presente. Esta fue la consideración que impulsó a Carl Sagan a escribir en el libro titulado precisamente *Pale blue dot: a vision of the human future in space* (1994) la siguiente reflexión: «La Tierra es el único mundo conocido que puede alojar la vida. No hay otro sitio, por lo menos en el futuro próximo, al que nuestra especie pueda migrar. Visitar, sí. Colonizar, aún no. Nos guste o no, por el momento la Tierra es donde jugamos nuestras cartas. Se ha dicho que la astronomía es una experiencia de humildad y que forja el carácter. No hay quizá mejor forma de demostrar la locura de las vanidades humanas que esta distante imagen de nuestro minúsculo mundo. Para mí, subraya nuestra responsabilidad de ocuparnos más amablemente el uno del otro y de preservar y proteger el pálido punto azul, la única casa que hemos conocido hasta ahora».

La Tierra, en el fondo, es una nave que viaja por el espacio en torno a una estrella llamada Sol. Pero es una nave muy especial, porque es aquella en la que nacemos y pasamos toda nuestra vida. Por eso debemos cuidarla, como también debemos cuidar a nuestros compañeros de viaje, la humanidad entera.

HACIA OTRAS ESTRELLAS

El Sol, ahora distante, continúa siendo el objeto más brillante del cielo. Pero ya no es capaz de calentar ni calentarnos. Desde este

momento, nuestro crucero proseguirá inmerso en la oscuridad del espacio profundo, con el cielo en torno a nosotros, salpicado por miríadas de puntitos luminosos a los que el Sol, a medida que nos alejamos de él, empieza a parecerse cada vez más. Pero ha sido precisamente el estudio de nuestra estrella el que nos ha permitido en gran parte saber cómo funcionan las otras. Por tanto, antes de orientar nuestro rumbo hacia nuevos sistemas planetarios, puede ser útil repasar lo que sabemos del Sol y luego de estas «bolas de gas incandescente, enormes, pero lejanísimas» (por usar la frase del jabalí Pumba, en la película *El Rey León,* en respuesta al suricato Timón, que, en cambio, sostiene que las estrellas son «pequeñas lentejuelas luminosas pegadas en el cielo»).

Por otra parte, el viaje es largo y tendremos mucho tiempo para leer. El espacio está esencialmente vacío. Aparte del Sol, la estrella más cercana, **Próxima Centauri** *(Proxima* es un término latino que significa «la más cercana» y Centauri es el genitivo del nombre latino de la constelación del Centauro, Centaurus, e indica que la estrella se encuentra en esa constelación), ¡dista casi 40 billones de kilómetros! Y, lo repetimos, es la más cercana. Ahora bien, considerando las distancias que tendremos que afrontar y de las que deberemos tratar, comprenderéis que los kilómetros ya no bastan, y que la unidad astronómica, que hemos usado para medir las distancias en el interior del Sistema Solar, también comienza a ser una unidad de medida un poco demasiado pequeña. Esa es la razón por la que los astrónomos, que a menudo tienen que vérselas con fenómenos extremos y, por tanto, con valores de magnitudes físicas muy alejadas de nuestra vida cotidiana, se han inventado una nueva unidad de medida de las distancias, el año luz *(light year:* y ahora sabéis por qué Buzz Lightyear lleva este apellido, mientras el nombre está dedicado a Buzz Aldrin, el segundo hombre que puso un pie en la Luna en el contexto de la misión *Apolo 11)*.

Pues bien, por definición, el año luz es la distancia recorrida por la luz en un año. Cuidado, es una medida de distancia, no una unidad de tiempo, ¡no os dejéis engañar por el nombre! Sabiendo que la luz —que es lo más veloz que se puede encontrar en el universo— viaja a unos 300.000 kilómetros por segundo y que un año tiene más de 31,5 millones de segundos, la cuenta ya está hecha: un año luz tiene una longitud de 9,46 billones de kilómetros, que los astrónomos, kilómetro más, kilómetro menos, redondean fácilmente a 10 billones de kilómetros. Sí, habéis entendido bien, en un año la luz recorre todo ese camino. ¡Una locura, eh! Si nosotros pudiéramos movernos a semejante velocidad, quién sabe cuántos sitios podríamos visitar.

Pensad: podríamos llegar a la Luna en poco más de un segundo, mientras que para llegar al Sol emplearíamos unos 8 minutos. Aunque no conviene llegar demasiado cerca de nuestra estrella, porque, como en el mito de Ícaro, podríamos quemarnos.

LA ESFERA DE LUZ

Muchos piensan que los astrónomos son criaturas de la noche, personas que duermen de día y se despiertan al atardecer para observar las estrellas hasta el alba. Pero en realidad uno de los objetos más hermosos e interesantes que observar y estudiar está visible solo de día: es nuestro **Sol,** la estrella en torno a la cual el planeta Tierra orbita a una distancia media de unos 150 millones de kilómetros y de la cual recibe diariamente —y desde hace algunos miles de millones de años— luz y calor suficientes para hacer nacer la vida y mantenerla.

Por otra parte, el Sol es la estrella más cercana a nosotros, y estudiarla a fondo permite, por un lado, entender mejor cuál ha sido su evolución y la evolución del sistema planetario al que pertenece igualmente nuestro planeta, pero, por otro, significa también y sobre todo comprender los mecanismos de funcionamiento y las leyes que regulan la vida y la evolución de las estrellas, cuyas características son, por desgracia, mucho más complejas de determinar a causa de la distancia.

Incluso a simple vista, el Sol emite una luz deslumbrante, a la que no es posible resistirse. Y si esto ocurre observándolo desde la Tierra, imaginémonos si decidimos embarcarnos en un crucero que sobrevuele la estrella. Es obvio que en el Sol no se puede aterrizar, no solo porque no tiene una corteza sólida sobre la que posarse sino sobre todo porque, con una temperatura superficial de casi 6.000 °C, quema, ¡vaya si quema! Además, emite también una gran cantidad de radiación muy energética, como rayos ultravioletas y rayos X, que, en resumen, hacen poco recomendable incluso acercarse demasiado. Por tanto, antes de afrontar el viaje, aseguraos de tener en la maleta las consabidas cremas protectoras, que, según el rumbo del crucero, deben tener factores de protección incluso mayores que las que necesitamos usar en Mercurio. De hecho, desde que existe el turismo solar, algunas empresas de cosméticos han empezado a producir cremas con factor de protección un millón, pero no estamos muy seguros de que sea suficiente... porque, aun así, algunos vuelven con quemaduras graves. ¡Quizá la responsabilidad sea de ciertos comandantes de nave espacial, que se acercan demasiado al Sol movidos por esa deplorable práctica de «inclinarse» ante la estrella!

Lo que vemos observando el Sol con un filtro o proyectando su imagen sobre una pantalla es la capa superficial, denominada **fotosfera** (del griego, «esfera de luz»), que es la parte de atmósfera de nuestra estrella que produce justamente luz solar, lo que explica el nombre. Diseminadas sobre la fotosfera, según el período en que se emprende el viaje, no es difícil percibir unas manchas oscuras más o menos grandes, llamadas **manchas solares.** Si se observan con atención, incluso desde la Tierra, se nota que las manchas solares presentan una estructura evidente: una zona central más oscura, llamada **sombra** de la mancha, rodeada por una zona ligeramente más luminosa, llamada **penumbra.** Pero, cuidado: las manchas solares son solo aparentemente oscuras: lo parecen por contraste con la superficie de la fotosfera, mucho más cálida y luminosa. Pero una mancha solar tiene, de todos modos, una temperatura de algunos miles de grados Celsius y es, por tanto, ¡mucho más calurosa que la superficie de muchas estrellas!

En general, las manchas solares están asociadas en grupos que pueden ser también muy extensos. Fue precisamente gracias al estudio del movimiento de las manchas solares como se descubrió, por un lado, que estas migran por la fotosfera, es decir, cambian de posición a lo largo del tiempo, y, por otro, que el Sol gira sobre sí mismo de manera diferencial, o sea, que en el ecuador gira más rápidamente que en los polos. En efecto, para completar una rotación sobre sí misma, nuestra estrella emplea unos 24,5 días en el ecuador y 38 en los polos.

De hecho, y aunque las manchas solares han sido observadas desde la antigüedad (algunas son tan grandes que se pueden advertir a simple vista, al amanecer o al atardecer, cuando la luz del Sol es menos intensa), solo cuando se comenzó a usar el telescopio fue posible descubrir su movimiento de rotación y medir el período de rotación del Sol en torno a su propio eje. El primero que las observó en el telescopio fue, sin duda, Galileo Galilei, hacia finales de 1610, pero como no publicó de inmediato sus resultados, el primer dibujo que documenta la presencia de estas zonas oscuras en la superficie lunar es obra del inglés Thomas Harriot (1560-1621), que observó el Sol al amanecer del 8 de diciembre de 1610 usando el denso manto de niebla londinense y alternando la observación con los dos ojos para evitar quedar cegado. Importante: ¡es un método totalmente desaconsejable porque la luz solar concentrada por una lente en la retina daña de manera irreversible las células fotosensibles del ojo! El primero que publicó sus propias investigaciones y documentó la rotación, en 1611, fue, en cambio, el astrónomo alemán Johannes Fabricius ([1587-1616], cuyo verdadero nombre era Johann

Goldsmid, aunque, siguiendo la moda de la época, latinizó su nombre), después de haber observado sistemáticamente las manchas durante algunos meses y haber registrado el movimiento en el disco solar. Esta puede ser considerada la primera prueba observacional de la rotación solar. Pero debieron pasar aún algunos años para tener la primera medición del período de rotación del Sol: fue en 1630, cuando otro astrónomo alemán, el padre jesuita Christoph Scheiner (1573 o 1575-1650), publicó los resultados de sus estudios, que lo habían llevado no solo a medir la velocidad de rotación ecuatorial del Sol sino también a observar que la rotación en las latitudes más altas es más lenta. En la práctica, Scheiner había descubierto la **rotación diferencial solar.**

De las manchas solares sabemos también que tienen un ciclo evolutivo de 11 años, correspondiente a la variabilidad temporal de la actividad magnética del Sol. El número (más allá de la forma) de las manchas presentes en la fotosfera no es constante y varía de día en día, precisamente porque su formación y evolución en la fotosfera están ligadas al campo magnético de nuestra estrella.

UN GAS EN EBULLICIÓN

Observando atentamente el disco solar, no es difícil percatarse de que en el borde es ligeramente menos luminoso que en el centro. Este fenómeno, conocido como **oscurecimiento en el limbo,** se debe al hecho de que, mirando hacia el centro del disco, miramos a través de una capa sutil de atmósfera hacia las capas profundas más cálidas y naturalmente más luminosas, mientras que, observando el borde o limbo, miramos solamente un espeso manto de capas superficiales, menos cálidas y brillantes que las profundas. Pero un observador con ojo agudo puede descubrir también que la fotosfera está compuesta por muchos pequeños «granos» luminosos separados por espacios más oscuros.

A esta característica de la fotosfera solar se la denomina **granulación,** y fue estudiada tanto por los telescopios solares en la Tierra como por muchos observatorios solares espaciales. En efecto, cada gránulo es una celda cálida de convección que sube de las profundidades del Sol, mientras que las zonas más oscuras son las partes enfriadas, que bajan nuevamente a la profundidad a causa de su mayor densidad. En la práctica, la fotosfera solar se comporta precisamente como un fluido en ebullición, donde células cálidas suben a la superficie enfriándose y células frías bajan calentándose nuevamente a causa del cruce de capas más cálidas. El fenómeno que da origen a la llamada granulación fotosférica es, por tanto, la

convección, que es uno de los tres modos de conducir calor (los otros dos son la conducción y la radiación). Si lo estáis pensando, pues sí, habéis acertado, ¡es precisamente lo que sucede con el agua que estáis calentando para vuestro té de la tarde!

¡LAS GAFAS DE SOL NO BASTAN!

Ya sabéis por experiencia directa que las gafas de sol, por oscuras que sean las lentes, no son suficientes para proteger nuestros ojos del deslumbramiento de la luz solar. Imaginémonos, entonces, qué puede ocurrir observando el Sol aún desde más cerca. Es obvio que cualquier nave espacial de crucero solar, además de ser capaz de proteger a los pasajeros no solo de la radiación, sino también del viento solar, debe estar dotada de ventanillas tintadas, aptas para filtrar la luz de la fotosfera.

Pero hay momentos en que es posible mirar directamente hacia el Sol y no quedar cegados por su luz: son los **eclipses totales de Sol,** que, vistos desde la Tierra, son absolutamente espectaculares (sin duda, más que desde cualquier otra parte del universo, lo garantizamos). Los eclipses totales de Sol se producen cuando la Luna se interpone entre nosotros y nuestra estrella ocultando completamente el disco. En estas particularísimas condiciones la fotosfera es totalmente oscurecida y su luz ya no puede deslumbrar: una noche irreal se manifiesta ante nuestros ojos con un **sol negro** destacando en el cielo. En esos pocos minutos de oscuridad con el Sol sobre el horizonte es posible ver otras dos capas de atmósfera solar que en condiciones normales son absolutamente invisibles a causa de la excesiva luminosidad de la fotosfera: la **cromosfera** y, sobre todo, la **corona.** Mientras que la primera se manifiesta sobre todo a través de las espléndidas **protuberancias** visibles en los bordes del disco oscurecido, enormes masas gaseosas expulsadas por la superficie solar y proyectadas hacia el espacio exterior, la corona es un sutilísimo velo luminoso que se recorta sobre el cielo oscuro del eclipse para iluminarlo levemente y para producir aún mayor contraste entre el disco negro creado por la Luna perfectamente superpuesta al Sol y el cielo mismo. Es precisamente esta circunstancia la que convierte a los eclipses de Sol en un espectáculo único: vistos desde la Tierra, Luna y Sol tienen prácticamente la misma dimensión angular, cerca de medio grado, así que el disco de la Luna puede superponerse casi exactamente sobre el del Sol.

En realidad los físicos solares han ideado también otros modos de estudiar la cromosfera y la corona, incluso cuando no hay eclipses de Sol. Pero estos representan aún hoy una ocasión única no solo para

disfrutar de un increíble espectáculo natural, sino también para realizar importantes observaciones científicas.

PERO ¿CUÁNTO TIEMPO DURARÁ?

Las estrellas no duran eternamente. También ellas nacen, viven y mueren. Algunas, como el Sol, viven miles de millones de años, y llegan con serenidad a la vejez y, finalmente, a la muerte, apagándose lentamente. Otras, en cambio, tienen vidas mucho más breves y atormentadas —aunque, a la escala de una vida humana, son muy largas—, pero, sobre todo, están condenadas a morir de muerte violenta (aunque sin derramamiento de sangre, no os preocupéis). En efecto, una enorme explosión, brevísima en comparación con la vida de la estrella, pone fin a su existencia: la estrella se ha transformado en una supernova. La luz de una **supernova** ilumina el cosmos: el estallido es visible desde miles de millones de años luz de distancia. Así, en el firmamento, surge una estrella donde antes aparentemente no había nada. He aquí el porqué del nombre: *nova,* en latín, significa «nueva». Para los antiguos había nacido una nueva estrella. Y aunque en realidad la estrella está muriendo, el nombre, de todos modos, se ha mantenido. Por cierto, el sufijo «super» fue añadido en 1933 por dos astrónomos, el alemán Walter Baade (1893-1960) y el suizo Fritz Zwicky (1898-1974), que asociaron estos hechos catastróficos a las estrellas de neutrones, cuya existencia supusieron, y a los rayos cósmicos, un flujo constante de partículas provenientes del espacio, y que sostuvieron la teoría de que fueran producidos precisamente en la explosión de las supernovas.

El Sol vivirá aún mucho tiempo y tendrá una muerte «dulce» y no explosiva, convirtiéndose en una **enana blanca.** Pero para saber cómo muere una estrella, primero hay que entender qué ocurre en el interior de las estrellas. Veamos, pues, cuáles son las fuentes de la energía estelar, sobre las cuales se debatió durante mucho tiempo hasta que hace menos de un siglo se obtuvo la solución. Ya 450 años antes de nuestra era, el filósofo Anaxágoras (496-428 a. C.) había intentado encontrar una solución al problema del origen y de las causas de la energía emitida por las estrellas y por el Sol en particular (no conociendo la física nuclear, pensaba en una causa como la fricción, que se debía generar entre las masas estelares en movimiento y el éter), pero hasta 1853, gracias al físico alemán Hermann von Helmholtz (1821-1894), no se intentó una primera aproximación científica válida para resolver la cuestión.

Helmholtz estableció, ante todo, que el Sol se había formado por contracción de una nebulosa primitiva bajo la acción de la gravedad.

La pérdida de energía potencial gravitatoria debida al autocolapso y la relativa conversión en calor habrían garantizado la continuidad de la radiación solar en el nivel actual durante unos cincuenta millones de años: la idea no estaba mal, pero, desgraciadamente para él, la geología primero y los estudios sobre las dataciones radiométricas después establecieron que el Sistema Solar era significativamente más viejo —unos 4.500 millones de años—, haciendo este mecanismo inadecuado.

¿ENERGÍA NUCLEAR? ¡SÍ, GRACIAS!

¿Cuáles son, pues, las causas de la radiación solar y estelar en general? Solo fue posible dar la respuesta una vez descubiertas las reacciones termonucleares, principales artífices de la producción de calor por parte de las estrellas, además obviamente de la ya admitida contracción, que proporciona el calor de ignición de dichas reacciones.

En 1939 los físicos alemanes Hans Bethe (1906-2005) y Carl Friedrich von Weizsäcker (1912-2007) consiguieron aislar, al fin, las dos reacciones responsables de la producción de energía en la mayor parte de las estrellas: la cadena protón-protón (conocida también con la expresión «cadena p-p», donde «p» es justamente el símbolo del protón) y el ciclo del carbono. Ambos procesos transforman cuatro protones (núcleos de hidrógeno) en un núcleo de helio, compuesto por dos protones y dos neutrones, pero con mecanismos diferentes.

En todo caso, estos procesos producen energía principalmente en forma de fotones gamma (el tipo de «luz» más enérgico existente) y de neutrinos (partículas neutras y con masa muy pequeña), mientras que los dos protones del primer ciclo y el carbono del segundo, resultantes de la serie de reacciones, son utilizados para la ignición de sucesivos ciclos.

En realidad los dos ciclos antes descritos no son los únicos, aunque sí los más importantes, sobre todo en el caso de temperaturas similares a las que se encuentran en el núcleo del Sol, en torno a 15 millones de grados Celsius. Esto es precisamente lo que los astrofísicos entienden cuando hablan de «horno nuclear»: ¡algo que es esencialmente imposible de reproducir en laboratorio! Durante las diversas fases de la evolución estelar se producen otros muchos tipos de reacciones nucleares. Por ejemplo, a temperaturas próximas a 20 millones de grados tiene lugar la reacción triple alfa, llamada así porque los núcleos de helio están también indicados con la letra griega alfa. A temperaturas superiores pueden sintetizarse elementos pesados como el oxígeno, el neón, el magnesio, el silicio y hasta el hierro. Pero no

más. Las reacciones de fusión más allá del hierro son endotérmicas: en la práctica, en vez de producir energía, la absorben, porque para fundir dos núcleos más pesados que el hierro es preciso suministrar energía. Por tanto, después del hierro, la fusión de los elementos ya no es útil para la producción de calor.

CUÁNTOS TIPOS DE ESTRELLAS...

Después de haber examinado las fuentes de energía de las estrellas, podemos analizar su evolución, es decir, el modo en que estas mudan con el tiempo. La mayor parte del tiempo las estrellas están en la fase en que funden hidrógeno en helio. Esta fase es llamada también **secuencia principal,** nombre con que se designa la zona más poblada de un gráfico que relaciona la luminosidad intrínseca de una estrella con su temperatura superficial o con el color, teniendo en cuenta que color y temperatura están en relación entre sí: en particular, las estrellas rojas son más frías, mientras que las azules son más cálidas, ¡justo lo contrario de lo que esperaríamos si pensamos en la definición que se atribuye a los colores cálidos y fríos!

Los astrofísicos llaman a este gráfico —importante instrumento de estudio de las estrellas— diagrama H-R, por las iniciales de sus creadores, los astrónomos Ejnar Hertzsprung (1873-1967), danés, y Henry Norris Russell, estadounidense (1877-1957). El resto de la vida de una estrella es relativamente breve respecto del tiempo que pasa en la fase de secuencia principal: de media, una estrella pasa cerca del 80% de su vida en esta fase. El tiempo que una estrella pasa en la secuencia principal depende claramente de la cantidad de combustible nuclear de que dispone y del ritmo con que lo consume. En definitiva, está relacionado con la masa y la luminosidad: naturalmente, las estrellas de gran masa tienen una vida más breve precisamente porque consumen más rápido su combustible.

Pero pasemos a estudiar ahora cómo nace, vive y muere una estrella, examinando los diferentes pasos evolutivos. Los astrofísicos estiman que las **protoestrellas,** o sea, los embriones de las que se convertirán en estrellas, se forman mediante la condensación inicial del **medio interestelar,** en las regiones —las nebulosas compuestas por gas y polvo, como la célebre **nebulosa de Orión,** en la constelación homónima— donde este es más denso. La contracción del gas, debida al colapso gravitatorio, contribuye en esta fase a aumentar la temperatura en el centro de la estrella, desde valores de pocas decenas de grados, típicos del medio interestelar, hasta los necesarios para la ignición de las reacciones termonucleares.

Una protoestrella habitualmente emite la mayor parte de su propia

radiación en las longitudes de onda infrarrojas, milimétricas y radio, precisamente a causa de su baja energía. Cabe señalar también que las protoestrellas no están nunca aisladas, sino que forman parte de un grupo o de un cúmulo, y eso se debe a que la nebulosidad de la que se originan contiene material suficiente para formar varias. Por eso una nebulosa como la de Orión es considerada una verdadera incubadora de estrellas.

Transcurrida esta fase, la estrella pasa a la secuencia principal, momento en que activa la fusión del hidrógeno en helio y vive siguiendo la escala temporal nuclear. La estrella alcanza aquí las condiciones de máxima estabilidad, en equilibrio entre la fuerza de gravedad, que tira hacia el interior de la estrella, y la presión del gas caliente (y de la radiación), que, en cambio, empuja hacia el exterior. Una estrella con la masa del Sol puede mantenerse en la fase de secuencia principal 10.000 millones de años (en la práctica, el Sol está «en medio del camino de su vida», ¡parafraseando a Dante!), mientras que las estrellas con masas inferiores, como las enanas rojas, pueden permanecer en esta fase durante cientos de miles de millones, cuando no billones, de años, un tiempo infinitamente mayor que la edad actual de nuestro universo, que es de unos 13.800 millones de años. Del lado opuesto, una **estrella azul de secuencia principal,** muy masiva y, por tanto, muy brillante, tiene una vida mucho más breve —aunque muy intensa, se podría decir—, como máximo de algunos centenares de millones de años.

Pero cuando el combustible empieza a escasear, la producción de energía obviamente disminuye, induciendo una nueva contracción del núcleo acompañada por la expansión de la envoltura exterior debida a la reanudación de las reacciones termonucleares: terminado el hidrógeno en el núcleo, a la estrella solo le queda contraerse de nuevo calentándose aún más.

En este punto, una envoltura exterior al núcleo, pero bastante interior como para alcanzar temperaturas de alrededor de 10 millones de grados, reactiva la combustión del hidrógeno y la expansión de las envolturas exteriores a él, mientras que el núcleo, constituido por helio, sigue contrayéndose. Esta fase de inestabilidad es superada cuando el núcleo, alcanzando temperaturas de 100 millones de grados, activa la combustión de helio. Las fuentes de energía son, en este momento, dos: el núcleo que quema helio y una envoltura más exterior que quema hidrógeno. El radio de la estrella aumenta dramáticamente, y con él la luminosidad, pero la superficie se vuelve más fría: la estrella es ahora una **gigante roja.** A todos los efectos, esta fase representa el inicio de la vejez del astro.

La ulterior evolución de una estrella puede pasar a través de otras combustiones nucleares, según su masa, hasta llegar a la fase de **supergigante roja.** En el caso de reacciones con formaciones de elementos pesados, la cantidad de energía producida tiene, de todos modos, valores más bajos.

La duración de la vida de una estrella en estas fases evolutivas es breve y, en cualquier caso, no comparable con el tiempo que ha permanecido en la secuencia principal. Varias veces, durante su evolución postsecuencia, una estrella puede encontrarse en la llamada «franja de inestabilidad del diagrama H-R», en la que temperatura y luminosidad son de tal magnitud que sus capas exteriores se vuelven inestables, y se manifiestan en forma de pulsaciones (variables pulsantes). En este caso, estamos frente a una **estrella variable intrínseca.** También el tiempo transcurrido en la franja de inestabilidad es relativamente breve, como lo es igualmente el tiempo que una estrella masiva puede pasar, una vez que ha salido de la secuencia principal, en las fases de **gigante azul** o, incluso, de **supergigante azul,** las estrellas más cálidas y brillantes que se observan en el cielo.

De todos modos, es preciso tener claro que si estamos en presencia de masas estelares demasiado pequeñas o demasiado grandes (la masa y la composición química son los únicos dos parámetros que determinan unívocamente la evolución de una estrella aislada), no es improbable que, por razones opuestas, todo esto no ocurra: en el primer caso, la temperatura demasiado baja no provoca la fusión del hidrógeno y la estrella se convierte en una **enana marrón,** mientras que en el segundo caso la presión de radiación es tan alta que desintegra la estrella.

CRÓNICA DE UNA MUERTE ANUNCIADA

A todas las estrellas, antes o después, les llega el momento de «morir»: todo lo que ocurre antes no es más que un anticipo del modo en que su existencia como estrellas verdaderas cesará, cuando ya no sean capaces de producir energía gracias a las reacciones termonucleares de fusión de los núcleos atómicos. Esta es la razón por la que hemos decidido dar a este epígrafe el título de la célebre novela del escritor colombiano Gabriel García Márquez (1927-2014), Premio Nobel de Literatura de 1982.

En efecto, los astrofísicos son capaces de prever cuál será el fin de una estrella y cómo se producirá, si de manera tranquila o, por el contrario, de un modo violento. La mayor parte de las estrellas termina su existencia en forma de **enana blanca,** esto es, con una

muerte «dulce»: simplemente se contraen, terminada la combustión de los distintos elementos, irradiando al espacio su energía térmica.

Una enana blanca típica tiene un radio de unos 5.000 kilómetros, prácticamente como nuestro planeta, pero una densidad media de aproximadamente mil millones de kilogramos por metro cúbico (o sea, una tonelada por centímetro cúbico, un millón de veces más densa que el Sol) y una temperatura en la superficie de 10.000 grados Celsius. A densidades tan elevadas la naturaleza del material estelar es la de gas degenerado (lo que significa que los electrones presentes ocupan todos los posibles niveles energéticos determinados por los respectivos números cuánticos). En estas estrellas es justamente la presión de degeneración de los electrones la que equilibra la fuerza de gravedad, que de otro modo colapsaría el núcleo. Pero una enana blanca no puede tener una masa que supere un cierto límite, pues de ser así continuaría indefinidamente contrayéndose por insuficiencia de fuerzas de oposición, dando origen a una estrella de neutrones (donde lo que se opone a la fuerza de gravedad es la presión de degeneración de los neutrones) o, para masas aún mayores, a un agujero negro.

Este límite crítico de masa equivale aproximadamente a 1,4 veces la masa del Sol y es conocido como «límite de Chandrasekhar», por el nombre del astrónomo teórico indio Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995), que fue el primero que lo determinó. Este valor es aparentemente bajo, pero sabemos por las observaciones que durante toda su vida las estrellas pueden perder grandes cantidades de masa (además de la que es transformada en energía), que las sitúan por tanto debajo de dicho límite. Las gigantes rojas, por ejemplo, pierden masa por efecto de los llamados «vientos estelares» debidos a la presión de radiación. A veces, a causa de tales pérdidas, provocadas por determinadas inestabilidades, la estrella se despoja de sus capas más exteriores, que acaban formando una **nebulosa planetaria,** y deja expuestas solo las capas más interiores, mucho más cálidas. Esta será la suerte que correrá nuestro Sol.

Las estrellas con mayor masa, al menos ocho veces más masivas que el Sol, en cambio, mueren de manera violenta, explotando como **supernovas.** Después de muchas fases de combustión nuclear, en que la estrella llega a sintetizar el hierro —puesto que las reacciones de fusión de este elemento son endotérmicas—, el núcleo se vuelve inestable e implosiona, mientras que las capas exteriores de la estrella explotan. En este punto, se produce una gigantesca liberación de energía, y la envoltura exterior, eyectada a gran velocidad y con temperaturas elevadísimas, formará el llamado residuo o **resto de supernova.**

Una supernova difunde en el espacio gran parte del material que constituía la estrella originaria. La nube de materia que se expande alejándose del núcleo de la explosión viaja a velocidades elevadísimas: varios millares de kilómetros por segundo (este es uno de los motivos por los que no es muy aconsejable precisamente vivir en un planeta que orbite alrededor de una estrella demasiado masiva: ser embestido por la onda de choque de la explosión de una supernova no es una experiencia en absoluto agradable, por no hablar de la cantidad de rayos gamma emitidos, infinitamente superior a cualquier explosión nuclear terrestre que seamos capaces de imaginar). A esta nebulosa, de forma irregular, en continua y rápida evolución, precisamente a causa de la velocidad de expansión de los gases expulsados, se la denomina «resto de supernova» (del inglés *SNR, supernova remnant)*. La luminosidad de este tipo de nebulosa se debe, en parte, a que es «iluminada» por la luz de la estrella que aún se encuentra en el centro, aunque una parte de la radiación emitida por la nube proviene también de procesos físicos que se producen directamente en el interior de la propia nube.

Mientras el gas eyectado se aleja a gran velocidad, el núcleo implosionado puede convertirse en una **estrella de neutrones,** con un radio característico de 10 kilómetros y una densidad media de unos cien mil billones de kilogramos por metro cúbico, comparable con la densidad de un núcleo atómico. Como ocurre con una bailarina, que aumenta su velocidad de rotación cuando acerca los brazos a su cuerpo (a causa del principio de conservación del momento angular), la estrella contraída aumenta notablemente su velocidad de rotación y puede ser observable, en determinadas circunstancias, en forma de púlsar (contracción de la expresión inglesa *pulsating star,* «estrella pulsante») en las frecuencias de las ondas de radio.

Pero también puede darse el caso de que la presión de degeneración de los neutrones ya no sea suficiente para resistir el colapso gravitatorio. En efecto, también las estrellas de neutrones tienen una masa límite, equivalente a unas 3 masas solares. En este caso, el resultado inexorable de la explosión de supernova es un **agujero negro,** llamado así porque su gravedad es tan fuerte que impide incluso que escape la luz (motivo por el cual es negro y, por tanto, invisible). Y es lo que ocurre con todas las estrellas cuya masa inicial supera las 25 masas solares.

HIJOS DE LAS ESTRELLAS

Estudiando la composición de las rocas de nuestro planeta encontramos elementos ligeros como el helio, el carbono y el oxígeno,

pero también elementos pesados como el cobalto, el oro, el plomo y el uranio. Los astrofísicos han entendido que los primeros están en realidad sintetizados en el interior de las estrellas durante las diversas fases evolutivas. Pero también han comprendido que el único mecanismo conocido capaz de producir los elementos más pesados que el hierro, como el oro, son las explosiones de supernova. En efecto, gracias a la enorme energía liberada en la explosión, en la nube de gas eyectada al espacio se pueden formar todos los elementos químicos mediante procesos de fisión nuclear, o sea, con los núcleos que captan protones o, más fácilmente, neutrones, en algunos casos produciendo también elementos radiactivos que decaen en otros elementos, liberando nuevamente energía que calienta y a alimenta el resto de la supernova.

Y es que, además, y gracias a las explosiones de supernovas, estos elementos están continuamente en circulación en el espacio. Si en el Sol y en nuestro Sistema Solar —y, por tanto, en la Tierra— se encuentran todos estos elementos, incluidos los pesados, es porque hace algunos miles de millones de años debió de explotar una supernova que proporcionó los materiales necesarios para la formación de la nebulosa protosolar de la que han luego nacieron el Sol y los planetas, incluida la Tierra. Ahora bien, no sabemos si Alan Sorrenti, cuando escribió *Hijos de las estrellas* (en 1977), pensaba precisamente en este concepto —muy probablemente no—, pero la vida en la Tierra no existiría sin la contribución fundamental de elementos pesados procedentes directamente de una estrella masiva que explotó cerca de nosotros, cuando ni el Sol ni la Tierra aún existían.

Y esta es la razón por la que de verdad somos todos hijos de las estrellas: uno cualquiera de los átomos que compone nuestro cuerpo ha sido sin duda sintetizado por la fusión nuclear que se producía en el núcleo de aquella estrella o en el resto de supernova eyectado en el espacio a consecuencia de la explosión.

ESTRELLAS JÓVENES, ESTRELLAS VIEJAS

Así pues, existen estrellas jóvenes, estrellas de mediana edad (como el Sol) y estrellas viejas. Pero sobre todo hay estrellas de diferentes generaciones. Nuestro Sol, por ejemplo, es sin duda de una generación posterior a la de la estrella masiva que explotó como supernova y a la que debemos agradecer habernos proporcionado todo el material necesario para construir nuestro sistema planetario.

Los astrofísicos se han planteado subdividir las generaciones de estrellas en **poblaciones estelares.** En la práctica, una población

representa una generación de estrellas. Naturalmente, dado que las estrellas tienen una vida larga, y que el universo no existe desde hace mucho tiempo, el número de generaciones de estrellas no es especialmente elevado. Se estima que como máximo son tres. En consecuencia, en la práctica, tenemos tres poblaciones estelares, denominadas «población I», «población II» y, por último, «población III», supuestas teóricamente pero de cuya existencia aún no se tienen pruebas fehacientes. Es fácil, ¿verdad? El problema es que, para simplificar la vida al público lector (en realidad, por motivos históricos), las estrellas de la población I son las más jóvenes —nuestro Sol pertenece a esta generación—, mientras que las más viejas, que forman parte de la primera generación de estrellas, nacidas inmediatamente después del Big Bang y ahora extinguidas (aunque quizá aún existan algunas, y los cosmólogos están tratando de darles caza), son de la población III.

Seguramente, llegados a este punto, os habréis formulado espontáneamente la pregunta: pero ¿cómo se distinguen las diversas generaciones de estrellas? Pues bien, existe un modo, incluso bastante sencillo, al menos desde el punto de vista teórico, que consiste en estudiar la composición química de las estrellas: si pensamos que los elementos pesados al principio no existían (al final de la nucleosíntesis primordial, pocos minutos después del Big Bang, los únicos elementos presentes eran en su mayor parte hidrógeno y un poco de helio), es fácil entender que si una estrella los contiene es seguramente de una generación posterior a la de una que no los contiene. El Sol contiene elementos pesados, como también la Tierra, por lo que solo puede ser una estrella de última generación.

En realidad, para ser más precisos, por población estelar los astrofísicos entienden un vasto conjunto de estrellas de todo tipo, pertenecientes a una galaxia, con características similares de edad y distribución espacial, o sea, el lugar que ocupan en el espacio, cinemática, es decir, cómo se mueven en el espacio, y metalicidad (en astrofísica, la metalicidad es la abundancia de elementos más pesados que el helio: es más, en aras de la sencillez, todos los elementos, al margen del hidrógeno y el helio, son llamados metales).

Así pues, las estrellas de la población I son estrellas generalmente jóvenes, con un alto contenido en metales (o sea, en elementos más pesados que el hidrógeno y el helio), y habitualmente pueden ser observadas en los brazos de las galaxias espirales (he aquí por qué el Sol es una estrella de la población I). Por este motivo son llamadas también «población de disco». Las estrellas de los **cúmulos abiertos** son de la población I. Estos cúmulos están constituidos por un número

de estrellas que puede variar de algunas decenas a varios centenares. De hecho, las estrellas de un cúmulo abierto son generalmente muy jóvenes o, en todo caso, entre las más jóvenes de las que se hallan en el interior de una galaxia. Están reagrupadas porque aún se encuentran en la zona en que han nacido, allí donde antes había una enorme nube de gas y polvo de la que han surgido.

Por este motivo, a menudo es posible observar cúmulos abiertos asociados a nebulosidades difusas que se vuelven visibles precisamente porque están iluminadas —mediante varios tipos de procesos físicos— por las estrellas del cúmulo que se hallan en su interior o en las inmediaciones, como sucede por ejemplo en el caso de las **Pléyades.** Se trata de uno de los cúmulos abiertos más famosos, en la constelación del Toro, en el que las estrellas —cerca de un millar, de color azul, cálidas y jóvenes, con una edad estimada de «apenas» 100 millones de años— están aún envueltas por una tenue nebulosidad, que constituye el material residual del que se han formado.

Los cúmulos abiertos se pueden observar en las galaxias espirales y son objetos del disco galáctico, por lo que se encuentran distribuidos sobre un plano, en concreto el llamado «plano galáctico», a lo largo de los brazos en espiral. En efecto, es en los brazos espirales donde se produce principalmente la formación estelar. En consecuencia, para buscar los que pertenecen a nuestra Galaxia es preciso apuntar los instrumentos a las zonas del cielo por donde pasa la Vía Láctea, la franja lechosa de estrellas que corta el cielo en dos partes y que representa el disco de nuestra Galaxia visto de lado por efecto de la perspectiva, porque el Sol —y, por tanto, nuestro punto de observación— se encuentra exactamente en su interior.

Las estrellas de la población II son, en cambio, estrellas viejas, de baja metalicidad, observadas en las zonas centrales *(bulge,* conocido con la expresión «bulbo galáctico») de las galaxias espirales, en las galaxias elípticas y en el halo de todas las galaxias. Por esta razón a la población II se la conoce también como «población de halo». Las estrellas de los **cúmulos globulares** son de la población II. Mientras que, en general, los cúmulos abiertos están entre los objetos más jóvenes observables en el interior de una galaxia, los cúmulos globulares son, en cambio, y sin lugar a duda, los objetos más viejos que puede contener una galaxia. A diferencia de los cúmulos abiertos, llamados así porque en ellos las estrellas están distribuidas de manera casual y sin una simetría específica, los cúmulos globulares son esencialmente esféricos, con una concentración de estrellas que aumenta desde la periferia hacia el centro del cúmulo. También el

número de estrellas que los constituye es muy distinto del que se observa habitualmente en los cúmulos abiertos: desde algunos centenares de miles hasta algunos millones, como **omega Centauri,** el cúmulo globular más masivo de nuestra Galaxia, que se estima que contiene unos 10 millones de estrellas, ¡con una edad de casi 12.000 millones de años! Los cúmulos globulares tienen una distribución espacial muy distinta de la de los abiertos: estos se encuentran distribuidos en el halo galáctico, un volumen esférico de materia que envuelve completamente nuestra Galaxia y está poblado por las estrellas más viejas observables, o sea, aquellas prácticamente nacidas poco después de su formación.

Las estrellas de la población III, por último, pertenecerían a una generación anterior a la de las estrellas de la población II y probablemente ya no son observables. De todos modos, la existencia de esta población estelar fue supuesta para explicar la presencia de elementos pesados en las estrellas de la población II. En la práctica, estrellas de la población III explotadas como supernovas habrían enriquecido de elementos pesados el medio interestelar del que luego habrían nacido las generaciones estelares sucesivas. Naturalmente no todas las estrellas pertenecientes a una cierta población han nacido a la vez, por lo que la clasificación recién descrita puede ser aún más detallada: así, por ejemplo, las estrellas muy jóvenes de ultimísima generación son llamadas de la población I intermedia. El mismo tipo de subdivisión se practica también con las estrellas de la población II.

Ahora que el Sol ya no tiene secretos para nosotros (¡ojalá fuera así!) y sabemos más o menos cuántas estrellas y de qué tipos son las que pueden tener planetas orbitando a su alrededor —por no hablar de los **sistemas binarios** o **múltiples,** o sea, de los sistemas compuestos de dos o más estrellas en órbita alrededor de un mismo centro de masas, con sus diferentes configuraciones y consiguientes «extrañezas» evolutivas—, ¡los turistas espaciales podemos finalmente movernos por los espacios interestelares para visitar algunos de los sistemas estelares más amenos y curiosos de nuestra Galaxia! Los rumbos están trazados, basta con disponer de un gran espíritu aventurero, de ropa y accesorios adecuados y de mucha paciencia, porque esta vez el viaje será de verdad larguísimo, ¡pero repleto de lugares salvajes y exóticos que explorar!

CAPÍTULO 11

EXOPLANETAS, ¡QUÉ MARAVILLA!

TIERRA

PLANETA

Distancia media del sol: 149,6 millones de km (= 1 au, unidad astronómica)
Masa: 5,9 cuatrillones de kg
Radio medio: 6.371 km
Temperatura mín./máx.: –88/58 °C
Duración del día: 23,93 horas
Duración del año: 365,26 días
Número de satélites: 1
Posee sistema de anillos planetarios: no

Si una estrella media, por no decir mediocre, como nuestro Sol puede tener un cortejo de planetas, asteroides y cometas, no hay ningún motivo para pensar que también la miríada de estrellas que puebla el cielo nocturno no pueda tener algunos planetas que orbiten en torno a ellas.

El problema es que, a causa de las distancias que nos separan también de las estrellas más cercanas, conseguir ver un planeta —que brilla solo y exclusivamente por la luz reflejada de la estrella en torno a la que orbita— no es una operación precisamente sencilla. Pero al final, gracias a la tenacidad y al ingenio de los astrónomos, hemos llegado incluso a descubrir planetas en órbita alrededor de otras estrellas, llamados por eso «planetas extrasolares» o, más sencillamente, exoplanetas.

La idea de que pudieran existir otros mundos, incluso habitables, además del nuestro, es antigua y, al menos en la historia occidental, puede remontarse a pensadores como Demócrito (460-390 a. C.) y Epicuro (341-270 a. C.). Ambos filósofos griegos creían en la existencia de infinitos mundos y suponían que algunos de ellos estaban poblados de plantas, animales y otras criaturas vivas. Esta idea recorrió los siglos hasta llegar a Giordano Bruno, que, en su libro

Del infinito, universo y mundos, publicado en 1584, escribió con extrema claridad: «Hay innumerables soles e innumerables tierras girando en torno a sus soles, exactamente del mismo modo que los siete planetas de nuestro sistema. Nosotros solo vemos los soles porque son los cuerpos más grandes y luminosos, y sus planetas nos resultan invisibles porque son más pequeños y no luminosos. Los innumerables mundos en el universo no son peores ni están menos habitados que nuestra Tierra» (los siete planetas son Mercurio, Venus, Tierra y Luna, en órbita alrededor de la Tierra, Marte, Júpiter y Saturno).

El filósofo y fraile dominico fue incluso más allá del heliocentrismo del sistema copernicano y supuso la existencia de un universo infinito, poblado por un número infinito de estrellas y de otros mundos: ideas por las que fue juzgado como hereje por la Inquisición católica y, después de haber vivido en el exilio durante décadas, condenado a morir en la hoguera. Pero su herencia de librepensador y sus ideas cosmológicas tuvieron gran importancia para el desarrollo de la ciencia, entonces naciente, y llegaron hasta nosotros como un gran ejemplo del modo en que la mente humana puede imaginar aun antes de ver, exactamente como hacen hoy los físicos teóricos.

La primera confirmación de las hipótesis de Giordano Bruno, o sea, el descubrimiento de un planeta exterior al Sistema Solar, se remonta a 1992, gracias a los estudios del astrofísico Alexander Wolszczan (1946). El científico polaco, analizando las emisiones de radio del púlsar **PSR B1257 + 12,** descubierto por él, se percató de que no eran regulares: parecían reflejar alteraciones provocadas por la atracción gravitatoria ejercida por cuerpos en órbita alrededor de él. Supuso que había dos planetas, y pronto la hipótesis encontró confirmación. Ahora sabemos que los exoplanetas de este púlsar, a unos 2.300 años luz de distancia en dirección a la constelación de Virgo, son tres. Por cierto, el más interior del sistema es también el exoplaneta con la masa más pequeña conocida, cerca de la mitad de la de la Luna.

El descubrimiento, pese a que generó una gran excitación entre la comunidad científica, también planteó un nuevo problema, y no irrelevante precisamente. Los astrónomos no esperaban encontrar planetas en torno a una estrella de neutrones, que es uno de los posibles resultados de la explosión de una supernova. Pero las hipótesis sobre el origen de estos planetas no tardaron en llegar. La primera —terrible para los posibles habitantes y visitantes de esos mundos— es que inicialmente fueron unos gigantes gaseosos cuya atmósfera fue arrasada por la explosión de la estrella madre. La segunda hipótesis es que, por el contrario, estos planetas nacieron

después de la explosión, por la agregación de los detritos y de los materiales residuales presentes en el resto de supernova. Si en el curso de vuestras peregrinaciones por la Vía Láctea os da por pasar por allí, podríais contribuir a resolver la cuestión.

DE ACUERDO, PERO ¿EN TORNO A ESTRELLAS SIMILARES AL SOL?

En todo caso, desde el descubrimiento de estos exoplanetas, la espera del anuncio del descubrimiento de un planeta extrasolar en órbita alrededor de una estrella ordinaria se hizo cada vez más frenética, y encontró su solución en un célebre congreso organizado en Florencia el 6 de octubre de 1995: fue en esa fecha cuando los astrónomos suizos Michel Mayor (1942) y Didier Queloz (1966), ambos adscritos al Observatorio de Ginebra, anunciaron el descubrimiento de un objeto de masa planetaria (0,5 veces la masa de Júpiter) en órbita alrededor de la estrella de tipo solar **51 Pegasi,** a unos 50 años luz de distancia de nosotros.

Era la primera vez que los astrónomos tenían las pruebas de la existencia de planetas en órbita alrededor de estrellas similares al Sol, pero fuera del Sistema Solar.

Desde aquel momento, la lista de exoplanetas descubiertos se ha alargado desmesuradamente, llegando a más de 5.000, algunos naturalmente pertenecientes a sistemas con múltiples planetas, como el nuestro. Más de 2.600 han sido descubiertos con un solo instrumento: el telescopio espacial Kepler, lanzado por la NASA en 2009 con el objetivo de buscar planetas similares a la Tierra en órbitas alrededor de otras estrellas. Y muchos otros ya están en lista de espera, simplemente aguardando una nueva observación que confirme su presencia. Pero, de todos los planetas descubiertos hasta ahora, solo algunos tienen una vaga semejanza con el nuestro. Sin embargo, ninguno de los más de 700 sistemas planetarios extrasolares múltiples —o sea, con más de un planeta orbitando en torno a la estrella central — se parece realmente a nuestro Sistema Solar, por número y variedad de planetas presentes.

¡CASI UN SISTEMA SOLAR!

Entre estos, el sistema que parece más prometedor, al menos por el momento, es el denominado **TRAPPIST-1:** un sistema planetario que está a unos 40 años luz de distancia de nosotros en dirección a la constelación de Acuario y cuya estrella central es una enana roja, en torno a la cual orbitan nada menos que siete planetas. De ellos, los seis más interiores son probablemente de tipo rocoso, o sea, como nuestro

planeta y los otros planetas del Sistema Solar interior (Mercurio, Venus y Marte). Además, cinco de estos son similares a la Tierra por dimensión y los otros dos son intermedios entre la Tierra y Marte. El cuarto, el quinto y el sexto planetas orbitan en la llamada «zona habitable» y, por tanto, podrían estar dotados de una atmósfera similar a la nuestra y, sobre todo, tener sobre la superficie agua en estado líquido: la zona habitable es la región en torno a una estrella en que las condiciones son tales que favorecen el nacimiento de formas de vida (la Tierra se encuentra en el centro de la zona habitable del Sistema Solar: ni demasiado cerca, como Mercurio y Venus, donde las temperaturas superficiales son inhóspitas, ni demasiado lejos, como Marte, donde, en cambio, las temperaturas son demasiado bajas para que la vida pueda mantenerse en la superficie).

Los siete planetas de TRAPPIST-1 orbitan tan cerca unos de otros — sus órbitas son decenas de veces más próximas que la distancia que separa la órbita de la Tierra de la de Marte— que algunos investigadores han supuesto incluso que, en el caso de que en uno de los planetas se haya formado la vida, esta podría haber sido transferida con extrema facilidad a los otros con una serie de procesos de panspermia interplanetaria, es decir, la transferencia de formas de vida (organismos simples, normalmente) de un cuerpo planetario a otro, transportadas por hipotéticos cometas o por asteroides. Los investigadores estiman que la probabilidad de que en TRAPPIST-1 opere el mecanismo de la panspermia puede superar en algunos órdenes de magnitud a la de, por ejemplo, el sistema Tierra-Marte y por tanto, en último término, a la del Sistema Solar en su conjunto.

A LA CAZA DE EXOPLANETAS

Si es tan difícil descubrir los exoplanetas, ¿cómo han conseguido los astrónomos descubrir tantos en tan poco tiempo? La respuesta es: desarrollando diversas técnicas, que emplean según las circunstancias. La técnica más obvia, naturalmente, es la de la observación directa, por desgracia solo posible para un restringido número de casos — normalmente gigantes gaseosos bastante distantes de la estrella central — y muy fatigosa habida cuenta de que tales cuerpos celestes son obviamente mucho menos luminosos que la estrella en torno a la que orbitan, razón por la cual su observación es perturbada por la luminosidad de la estrella misma. Pero en realidad, como es fácil imaginar, la mayor parte de los planetas ha sido descubierta a través de técnicas indirectas de observación. Entre estas las principales son tres: el método de las velocidades radiales, el método astrométrico y el método de los tránsitos.

El primer método consiste en buscar posibles variaciones en las longitudes de onda de la luz emitida por una estrella. Para entender cómo funciona, pensemos en lo que ocurre cuando oímos la sirena de una ambulancia acercándose a nosotros y luego mientras se aleja. La experiencia nos enseña que la sirena al aproximarse tiene un sonido más agudo que cuando se distancia. Este fenómeno se denomina **efecto Doppler,** por el nombre del físico austríaco Christian Andreas Doppler (1803-1853), que fue quien lo descubrió, en 1845, aplicado a las ondas sonoras. El físico francés Hippolyte Fizeau descubrió independientemente el mismo efecto en las ondas electromagnéticas en 1848 (de hecho, en Francia al efecto se lo llama a veces «efecto Doppler-Fizeau»). En la práctica, cuando una fuente de ondas (sonoras, luminosas, etc.) y un observador están en movimiento la una respecto del otro, se produce una variación de las longitudes de onda percibidas: cuanto más se alejan, tanto mayores son las longitudes de onda emitidas.

En general, por tanto, cuando una fuente sonora se acerca, percibimos más agudo el sonido (en consecuencia, con una longitud de onda menor). Cuando, en cambio, se aleja, el sonido cambia de frecuencia y lo percibimos cada vez más bajo (o sea, con longitudes de onda mayores). Análogamente, los colores de una fuente luminosa que se acerca muy rápidamente nos parecen desplazados hacia longitudes de onda menores, es decir, hacia el azul (de ahí la expresión inglesa *blue-shift),* mientras que los de una fuente luminosa que se aleja los percibimos desplazados hacia el rojo *(red-shift)*.

Volviendo al caso de una estrella, precisamente a causa del efecto Doppler, la longitud de onda de la luz estelar que observamos depende del movimiento relativo de la fuente y del observador. Si objetos pesados orbitan en torno al astro, y en consecuencia lo obligan a oscilar orbitando en torno al centro de masas común del sistema, la luz emitida cambia ligeramente de espectro (el fenómeno se entiende bien si pensamos, por ejemplo, en un tiovivo: cuando miramos el tiovivo en rotación, una parte de este se aleja de nosotros mientras que la opuesta se acerca. Después de media vuelta, las dos partes se han invertido, y así sucesivamente hasta que el tiovivo se detiene). Con este método Mayor y Queloz descubrieron el primer planeta en órbita alrededor de una estrella de tipo solar, la 51 Pegasi.

La segunda técnica empleada en la búsqueda de planetas extrasolares consiste, en cambio, en la **medición de la posición de las estrellas,** o sea, en el empleo de técnicas astrométricas. En efecto, las estrellas no están fijas en el cielo, sino que se desplazan lentamente. El efecto de la presencia de planetas orbitando en torno a

ellas y de su atracción gravitatoria determina una ondulación en «zigzag» de la huella de su desplazamiento, que de otro modo sería lineal.

Por último, el **método de los tránsitos** consiste en revelar ligeras disminuciones periódicas de la luminosidad de una estrella causadas por el paso de un planeta frente a ella (es lo que le ocurre al Sol durante los eclipses, o sea, cuando la Luna pasa por delante de él, ocultándolo parcial o totalmente). La magnitud del descenso de luminosidad permite calcular el diámetro del planeta (asumiendo que el de la estrella pueda ser estimado con precisión). Para que el método de los tránsitos sea aplicable, es preciso que desde la Tierra se observe la órbita del planeta casi de lado. Esto permite también establecer la oscilación de la velocidad radial de la estrella (con el desplazamiento Doppler antes citado), de la que es posible extraer informaciones sobre la masa efectiva del planeta.

Así, el conocimiento de la masa y de la densidad del planeta permite calcular su densidad media, y de esta a su vez es posible deducir su composición, en concreto, si está formado principalmente por gases o por rocas. En algunos casos, ha sido posible identificar espectroscópicamente los gases en las atmósferas de los planetas gigantes en tránsito.

En resumen, la búsqueda de otros sistemas planetarios ha comenzado, en efecto, hace menos de treinta años, pero los resultados obtenidos hasta hoy son sumamente prometedores.

PLANETAS DE TODO TIPO

Si deambulando por el Sistema Solar pensabais que habíais visto todos los tipos de planetas, debéis saber que estabais muy equivocados. La variedad de exoplanetas descubiertos es enorme, y no siempre es fácil clasificarlos.

Por supuesto, muchos exoplanetas tienen dimensiones y características similares a las de Júpiter o Neptuno (o intermedias entre ambos) —son los más fáciles de descubrir porque su masa perturba de manera significativa el movimiento de la estrella en torno a la cual orbitan—, pero estos cuerpos, en general, orbitan tan cerca de sus estrellas que sus atmósferas son extremadamente calientes, con temperaturas de más de 1.000 grados Celcius.

Por este motivo son también conocidos con los nombres de **júpiter calientes** *(Hot Jupiters,* en inglés) y **neptunos calientes.** En cualquier caso, entran todos, junto con los gigantes helados, como Urano y Neptuno en nuestro Sistema Solar, en la vasta categoría de los gigantes gaseosos. Pero existen también planetas gaseosos con

dimensiones significativamente más pequeñas que las de Neptuno, y por eso se los denomina **minineptunos.**

Otros, en cambio, orbitan en torno a estrellas frías (incluso en torno a enanas marrones, estrellas fallidas) o tan lejos de las respectivas estrellas que sus superficies son extremadamente frías y perpetuamente heladas. Pero algunos orbitan en torno a estrellas similares al Sol y tienen una superficie sólida y rocosa y una atmósfera que permitirían sostener formas de vida: a los exoplanetas de este tipo pero de dimensiones más grandes que la Tierra se les llama **supertierras.** Por otra parte, también la Tierra ha sido, durante mucho tiempo, inhóspita: hace unos 4.000 millones de años —600 millones de años después de haberse formado— entró en la «era del bombardeo intenso», una larga e intensa lluvia de meteoritos que, según sostienen algunos científicos, podría haber también traído o producido las «semillas» químicas de las que luego se originó la vida. Y lo cierto es que se han encontrado muchos planetas de tipo terrestre absolutamente inhóspitos, pero eso sí, con las composiciones más heterogéneas, como planetas de carbono, de hierro, de lava y algunos más.

Pero son muchas también las estrellas en torno a las cuales orbitan anillos de polvo y detritos helados. Los astrónomos consideran que estos objetos son lo que queda del proceso de acreción que da origen a los planetas. En efecto, en este proceso, el material más denso y cercano a la estrella se condensa en planetas de diversas dimensiones, mientras que el material residual es proyectado hacia el exterior del sistema y acaba constituyendo una franja más o menos rarefacta de cuerpos de dimensiones medias y pequeñas, que permanecen en órbita alrededor de la estrella, retenidos por los efectos gravitatorios de los planetas gigantes, como se observa en nuestro sistema planetario, que tiene un anillo exactamente de este tipo, representado por el cinturón de Kuiper.

MUNDOS HABITABLES

Pero de todos los planetas descubiertos hasta ahora, ninguno puede ser considerado un gemelo de nuestra Tierra, ni ningún sistema extrasolar se parece verdaderamente a nuestro Sistema Solar, sea por número, sea por variedad de planetas presentes. La única excepción es la del sistema **Kepler-90,** donde una estrella de tipo solar —a una distancia de más de 2.800 años luz en dirección a la constelación del Dragón— tiene un cortejo de ocho planetas, como el Sol. También en este sistema los planetas rocosos están más cerca de la estrella central, y los gaseosos, más lejos.

En concreto, los seis planetas interiores tienen dimensiones que van de las supertierras a los minineptunos, mientras que los dos planetas exteriores son gigantes gaseosos. Contado así, podría parecer que estamos casi delante de un pariente cercano de nuestro sistema planetario, si no fuera porque el planeta en órbita más alejado de la estrella se encuentra a una distancia inferior a la que separa la Tierra del Sol. En la práctica, si pusiéramos la estrella central de Kepler-90 en el sitio del Sol, el sistema planetario estaría totalmente comprendido en el interior de la órbita terrestre.

Pero la caza de estrellas con planetas habitables, conocidas como habstars (de *habitable stars,* contracción de la expresión *stars with habitable planets),* se puede considerar recién comenzada, aunque el objetivo estaba fijado desde hacía tiempo: encontrar, en la miríada de exoplanetas que —ahora estamos seguros— pueblan nuestra Galaxia (y también las otras galaxias, obviamente), el gemelo de la Tierra. Para descubrir si también allí, como aquí, ha podido nacer y desarrollarse la vida.

Una de las condiciones que los astrónomos consideran esenciales para que el planeta sea hospitalario desde este punto de vista es que sea un **planeta Ricitos de Oro.** Sí, tal cual: planeta «Ricitos de oro». El motivo por el cual a los planetas potencialmente hospitalarios para la vida se los llama así se dice pronto. En efecto, *Ricitos de oro y los tres osos* es un antiguo cuento de hadas de origen inglés. En su versión más célebre, la protagonista es una niña, llamada justamente Ricitos de oro (Goldilocks, en la versión original) que, puesta ante una elección, manifiesta la tendencia a eliminar los extremos para optar siempre por el término medio, el que para ella es el «justo». Así, partiendo de este cuento, los astrónomos han definido un planeta Ricitos de oro: un planeta que tiene las condiciones «justas» para que pueda desarrollarse la vida en él. Y para que esto ocurra, el planeta debe hallarse en la zona habitable circunestelar, o sea, a una distancia de la estrella que garantice en la superficie del planeta la presencia de agua en estado líquido, considerada condición esencial para el desarrollo de formas de vida.

De todos modos, los astrónomos han encontrado algunos planetas semejantes al nuestro. No exactamente gemelos, sino análogos terrestres —como son llamados—, o sea, exoplanetas con condiciones similares a las de la Tierra. Ahora bien, entrar en este restringido círculo de planetas no es un asunto precisamente baladí, porque, para poder ser considerado un análogo terrestre, un cuerpo planetario debe respetar toda una serie de condiciones, entre las cuales las principales son: orbitar en torno a una estrella de tipo solar, hallarse en la zona

habitable circunestelar, presentar unas características físicas, como masa y dimensiones, comparables a las de la Tierra y poseer una atmósfera con características físicas (como temperatura y presión) y químicas (como la composición) adecuadas. Juntando todos estos parámetros, es posible calcular un indicador —denominado ESI *(Earth Similarity Index),* o sea, índice de similitud terrestre— que justamente define en porcentaje el grado de semejanza con nuestro planeta. De momento, ningún exoplaneta conocido tiene un ESI equivalente al 100%, pero existe alguno con ESI equivalente al 93%: se llama **Teegarden b** y orbita en torno a una enana roja, llamada «estrella de Teegarden» por el nombre del astrofísico estadounidense Bonnard J. Teegarden, que la descubrió en 2003.

Esta estrella, con una masa apenas suficiente para conseguir desencadenar la fusión del hidrógeno en el interior de su núcleo (con que su masa hubiese sido un poco inferior, habría quedado como una enana marrón), dista 12 años luz en dirección a la constelación de Aries y tiene dos planetas de tipo terrestre, ambos con órbitas comprendidas en el interior de la zona habitable que, incluso, podrían también poseer una atmósfera densa.

Las probabilidades estimadas no son altísimas, pero al menos uno de los dos podría alojar en la superficie agua en estado líquido. Se entiende perfectamente que una buena aventura interestelar hacia este sistema podría depararnos también la sorpresa de descubrir formas de vida similares a las existentes en la Tierra (y, por qué no, también una civilización alienígena, acaso más evolucionada que la nuestra). No solo esto: también podríamos hallar un lugar donde refugiarnos si se diera el caso —por desgracia, nada inverosímil— de que nuestro planeta ya no estuviera en condiciones de alojarnos.

MUNDOS REALMENTE EXTRAÑOS... ¡E INHÓSPITOS!

La mayor parte de los nuevos mundos es totalmente diferente de la Tierra. Mundos increíbles, de características únicas. La que sigue es la guía de algunos de los sistemas planetarios más extraños descubiertos hasta ahora. Por desgracia, las agencias de viajes interestelares aún no se han organizado para gestionar cruceros hacia estos destinos. Todos demasiado costosos, y algunos también muy peligrosos. Pero quién sabe, tal vez algún día este catálogo —que intentamos escribir como si fuera una especie de folleto publicitario para viajes de aventuras— pueda ser hojeado por astroturistas en busca de espectáculos naturales que les susciten emociones fuertes.

EL EXOPLANETA MÁS CERCANO

Para encontrar el planeta extrasolar más cercano ni siquiera hay que molestarse demasiado: Próxima Centauri, la estrella más cercana a nosotros, aloja un planeta de tipo terrestre en órbita en la zona habitable. Pero no es fácil establecer si **Próxima Centauri b** es de verdad habitable. La enana roja en torno a la que orbita es una estrella variable perteneciente al tipo denominado «fulgurante» *(flare star,* en inglés). En la práctica, de vez en cuando sufre imprevistos aumentos de luminosidad vinculados a la liberación de energía causada por la interacción entre los gases atmosféricos y el campo magnético de la estrella. Así, el exoplaneta es embestido por un viento estelar algunos miles de veces más intenso que el viento solar que golpea la magnetosfera terrestre. Pero desde Próxima b el espectáculo del cielo debe de ser, de todos modos, sublime, teniendo en cuenta que, siempre en torno a Próxima Centauri, debería hallarse otro planeta, **Próxima Centauri c**, cuya naturaleza es aún poco conocida —quizá una supertierra, quizá un minineptuno—, y, sobre todo, que en el cielo se ven yuxtapuestas las otras dos estrellas del sistema múltiple al que pertenece Próxima. Y es que Próxima es solo una de las tres estrellas —además, la más pequeña y la menos brillante— que componen el sistema de alfa Centauri, en el que las dos componentes brillantes, alfa Centauri A y alfa Centauri B, son dos estrellas de tipo solar, mucho más cálidas y brillantes que Próxima. ¡Sin duda merece un viaje!

EL AÑO MÁS LARGO

Es difícil que esté habitado, pero si lo estuviera, sus habitantes probablemente ni siquiera se percatarían de que se mueven en torno a una estrella, dada la distancia a la que esta se encuentra del planeta. Se trata del gigante gaseoso **2MASS J2126-8140,** de unas 13 veces la masa de nuestro Júpiter, que orbita a la considerable distancia de casi 700.000 millones de kilómetros de la enana roja TYC 9486-927-1: una distancia de más de 4.500 veces la que separa la Tierra del Sol. Con una órbita tan amplia —la más extensa detectada hasta ahora—, 2MASS J2126-8140 consigue dar una vuelta completa en torno a la estrella central —que, vista desde tal distancia, puede incluso ser confundida con las otras estrellas del cielo—, en unos 900.000 años terrestres. Para visitar este sistema planetario es preciso viajar durante algo menos de 90 años luz en dirección a la constelación austral del Octante.

EL HADO ADVERSO

Dentro de 5.000 millones de años el Sol, agotado el hidrógeno del núcleo y terminada así la fusión termonuclear de ese elemento, empezará a fundir helio, convirtiéndose en una gigante roja. En esta fase sus capas exteriores se expandirán hasta tal punto que abarcarán también la órbita de la Tierra, que, por tanto, ya no será habitable. Podemos hacernos una idea de lo que ocurrirá con nuestro planeta estudiando **Kepler-432b,** que orbita justamente en torno a una gigante roja en expansión. En efecto, la estrella, Kepler-432 A, que forma parte de un sistema binario a unos 9.000 años luz de distancia en dirección a la constelación del Cisne, ha empezado el recorrido que, después de la fase de gigante roja, la llevará a convertirse en una enana blanca. Pero entre tanto —en unos 200 millones de años, según estimaciones de los astrónomos—, el planeta Kepler-432b será poco a poco ralentizado en su órbita para acabar «absorbido» y, por último, vaporizado por la atmósfera de su estrella. A saber si, cuando le toque a la Tierra, ¡nuestros descendientes habrán encontrado el modo de huir a tiempo del planeta!

EL PLANETA EN VÍAS DE DESINTEGRACIÓN

Hay planetas aún más desafortunados que Kepler-432b, los que están en vías de desintegración: se trata de planetas tan cercanos a su estrella que son despojados de los gases atmosféricos y, en algunos casos, incluso de las rocas superficiales, de modo que, en el curso de algunos millones de años, ya no quedará nada.

De estos, el caso más sorprendente es el del planeta **K2-22b,** a más de 730 años luz de nosotros, en la constelación de Leo, con un período orbital apenas superior a nueve horas. El planeta orbita rápidamente en torno a la estrella y a muy poca distancia: 45 veces más cerca de Mercurio respecto del Sol. Y esta es la razón por la que los astrónomos han descubierto que se comporta casi como un cometa: con una larga cola de polvo que no solamente lo sigue, sino que también lo precede. Material que del que la estrella lo va despojando, hasta que lo haya desintegrado completamente.

MUNDO SOLITARIO

Cuando pensamos en un planeta, nos lo imaginamos en órbita alrededor de una estrella. Pero no siempre es así. En efecto, hay algunos planetas que se encuentran vagando en el espacio, lejos de cualquier estrella. Los planetas solitarios *(rogue planets,* en inglés) han sido expulsados de las órbitas en torno a sus estrellas y deambulan

libremente, lejos de cualquier órbita prestablecida. Son difíciles de hallar, pero no imposibles: entre estos encontramos **PSO J318.5-22,** seis veces la masa de Júpiter, aislado, pero suficientemente cálido para ser observado directamente. Está a unos 80 años luz de nosotros, en la constelación austral del Pintor. No se conocen muchos de estos objetos, llamados también «planetas interestelares», pero en el futuro, con telescopios cada vez más potentes, será más fácil descubrirlos. Algunas teorías sobre la formación de los planetas prevén que la mayor parte de los planetas o los protoplanetas será expulsada. En la práctica, podemos considerarnos afortunados por encontrarnos en un planeta con una órbita estable en torno a una estrella como el Sol.

EL PLANETA TATOOINE

Los fans de la saga de *La guerra de las galaxias* saben perfectamente que la familia Skywalker (Anakin y su hijo Luke) es originaria del planeta Tatooine, que tiene la particularidad de orbitar en torno a un sistema binario. Pero el ocaso con dos estrellas no existe solo en la fantasía. Es más, en la naturaleza se han descubierto incluso planetas pertenecientes a sistemas triples, ¡como hemos visto hablando de Próxima Centauri b!

La mayoría de los planetas se encuentra en sistemas solares que no se parecen en absoluto al nuestro. En efecto, cualquier hipótesis formulada pensando en analogías con nuestro Sistema Solar queda a menudo violentamente refutada cuando luego es aplicada al resto de los planetas conocidos. Y este es el caso de **Kepler-16 (AB)b,** un planeta de masa similar a la de Saturno en órbita alrededor del sistema binario Kepler-16. A unos 250 años luz de distancia de nosotros, en dirección a la constelación del Cisne, representa el primer caso observacional confirmado de planeta circumbinario, o sea, en órbita alrededor de dos estrellas a la vez. Con un período de revolución de 229 días, garantiza a los hipotéticos visitantes albas y ocasos que les dejarán sin aliento, justo como en Tatooine, ¡que es también el apodo dado a este exoplaneta!

LA ESTRELLA DESAFORTUNADA

Se dice que las personas afortunadas han nacido con buena estrella. Creencias astrológicas aparte, existe sin duda un planeta nacido con mala estrella, es más, una estrella que nunca se ha encendido: se trata de **2M1207b,** un gigante gaseoso, con una masa equivalente a unas cinco veces la de Júpiter, que orbita en torno a la enana marrón 2M1207A, a unos 170 años luz de nosotros en dirección a la

constelación del Centauro. Las enanas marrones son estrellas fallidas: tienen masas insuficientes para desencadenar las reacciones termonucleares en su interior. Una enana marrón, pues, no es capaz de quemar su combustible nuclear, a pesar de lo cual durante algún tiempo puede estar caliente a causa de la contracción gravitatoria. El planeta orbita a una distancia similar a la que separa Plutón del Sol, lo que significa que no recibe mucha luz de la estrella, pero tiene, de todos modos, una temperatura superficial estimada de más de 1.300 grados Celsius. Es, sin duda, inhóspita, pero ostenta un récord importante: a pesar de que es 100 veces menos brillante que la estrella en torno a la que orbita, es el primer exoplaneta descubierto con una imagen directa, tomada en abril de 2004 por el Very Large Telescope del Observatorio Austral Europeo (ESO).

EL PLANETA PRECIOSO (QUIZÁ)

A 40 años luz de nosotros, en la constelación de Cáncer, se encuentra una estrella similar al Sol, 55 Cancri A, en torno a la cual orbitan cinco planetas (y una estrella compañera, 55 Cancri B). Uno de ellos, **55 Cancri e,** con un diámetro que duplica el de nuestro planeta y una masa casi nueve veces mayor, fue el primero en ser considerado una supertierra. Pero la semejanza con la Tierra acaba aquí. Sí, porque según los astrónomos el planeta está compuesto esencialmente de carbono. Y mucho de este carbono, en las condiciones de temperatura y presión que se detectan en el interior del planeta, se hallaría en su forma más noble, la del diamante. En la práctica, estaríamos frente a una gran piedra preciosa espacial, que sigue reservando muchas sorpresas a los astrónomos.

En efecto, 55 Cancri e fue el primer planeta cuya atmósfera, rica en hidrógeno y helio, pero carente de vapor de agua, ha sido posible analizar. No obstante, un estudio aún más reciente sostiene, en cambio, que es similar a la de la Tierra, aunque mucho más espesa y cálida. No solo esto: la superficie del planeta podría estar envuelta en lava incandescente. En resumen: el diamante, si existe, sin duda está en una caja fuerte.

EL PLANETA OSCURO

Todos sabemos que los planetas no brillan con luz propia, sino solo con luz reflejada. Pero no todos los planetas reflejan la luz de sus estrellas de la misma manera. Hay algunos más brillantes (la Tierra es uno de ellos, gracias a las nubes), y otros, mucho, mucho menos. Esto significa que de planetas como **TrES-2b** será difícil obtener

informaciones. Sí, porque es el exoplaneta más oscuro de todos los que se han identificado. Su poder reflectante —o albedo— es inferior al 1%, o sea, refleja menos del 1% de la luz que le llega de la estrella en torno a la que orbita. Los astrónomos no conocen el motivo de este albedo tan bajo, pero es como si el planeta estuviera completamente envuelto por un barniz acrílico de color negro mate. Similar a Júpiter, orbita en torno a una estrella que está a 700 años luz de distancia, en la constelación del Dragón, y tiene el honor de ser el primer objeto observado por el telescopio espacial Kepler, motivo por el cual se le llama también Kepler-1b.

EL PLANETA DE AGUA

Uno de los aspectos más fascinantes del estudio de los planetas extrasolares es tratar de entender cómo están hechos, si son sólidos, líquidos o gaseosos, cuál es su composición, si disponen de atmósfera, si tienen satélites o si pueden albergar vida. En efecto, el agua es una de las moléculas más buscadas, sin duda porque sin ella la vida en la Tierra no habría nacido. Pero en el planeta **Gliese 1214 b** —en órbita alrededor de una enana roja a 42 años luz de distancia de nosotros en dirección a la constelación de Ofiuco (el Serpentario)— parece haber mucha más que en nuestro planeta. Clasificado como una supertierra, según algunos modelos planetarios Gliese 1214 b podría estar completamente envuelto por un océano de agua líquida coronado por una espesa atmósfera. Y no solo esto: a causa de las altísimas presiones que se detectan a algunas decenas de miles de kilómetros de profundidad, el agua podría hallarse en estados de la materia particulares, como formas exóticas de hielos o plasmas.

¿PLANETA O COMETA? ¡PLANETA COMETA!

En dirección a la constelación del caballo alado Pegaso, a una distancia de unos 150 años luz de nosotros, se encuentra una estrella muy similar a nuestro Sol: HD 209458. Pero cada tres días y medio, por delante de HD 209458 pasa otro objeto que la oculta parcialmente, reduciendo temporalmente su luminosidad (de apenas el 2%). En 1999, dos grupos independientes de investigación descubrieron que ese objeto era en realidad un planeta, con una masa equivalente a unas 200 veces la de la Tierra (por comparación, Júpiter tiene 318 masas terrestres), y en órbita alrededor de la estrella central a una distancia de apenas 6,5 millones de kilómetros, demasiado cerca para ser mínimamente hospitalario. **HD 209458 b** ostenta, pues, el récord de ser el primer planeta descubierto en tránsito ante su propia

estrella.

La atmósfera del planeta, compuesta casi exclusivamente por hidrógeno, consigue escapar lentamente de la atracción gravitatoria del propio planeta, formando así una especie de cola similar a la de los cometas. ¡Pero en este caso se trata de un «cometa» gigantesco!

LLUVIA DE ROCAS…

En el Sistema Solar hemos encontrado lluvias de metano, granizadas de amoníaco y otros variados fenómenos meteorológicos curiosos, pero la lluvia de rocas es, según un estudio, prerrogativa exclusiva del exoplaneta **K2-141b,** un mundo rocoso poco más grande que la Tierra, pero en una órbita realmente demasiado cercana a la estrella central, una enana naranja, un poco más pequeña y fría que el Sol. Enganchado gravitatoriamente a la estrella, como la Luna con la Tierra, también K2-141b vuelve siempre la misma cara hacia la superficie ardiente de la estrella, hasta el punto de que se calienta hasta temperaturas superiores a 3.000 ˚C. A estas temperaturas, las rocas se funden y algunos materiales se evaporan. En ese momento entran en juego los vientos violentos del planeta, que soplan sobre la superficie a velocidades supersónicas, llegando a alcanzar hasta los 5.000 kilómetros por hora. Son los vientos los que arrastran estos «vapores de rocas» hacia el lado nocturno, siempre en la oscuridad y por eso mucho más frío: unos –200 ˚C. A estas temperaturas los vapores minerales se condensan de nuevo en rocas y se precipitan en el océano de magma subyacente, que podría envolver todo el planeta. Una vez aquí, las corrientes del magma devuelven las rocas hacia el hemisferio caliente para luego recomenzar el ciclo, de manera similar al del agua sobre la Tierra. Con efectos sin duda devastadores tanto para la atmósfera como para la superficie del exoplaneta.

… ¡Y LLUVIA DE HIERRO!

Si la lluvia de rocas incandescentes os parece una aventura fácil de afrontar, ningún problema, porque el catálogo de exoplanetas ofrece también otras experiencias para profesionales de las condiciones meteorológicas extremas. Por ejemplo, una lluvia de hierro fundido. ¿Qué decís, os puede interesar? También aquí nos movemos todavía en el campo de las hipótesis, pero es muy probable que **WASP-76b,** un júpiter caliente en órbita alrededor de una estrella de tipo solar a unos 640 años luz de distancia en dirección a la constelación de Piscis, pueda ser perfecto para vosotros. También este exoplaneta está en rotación sincrónica, como la Luna, y muestra siempre el mismo

hemisferio a la estrella. Así, el hemisferio caliente, siempre iluminado, alcanza temperaturas de 2.400 ˚C, mientras que en el nocturno las temperaturas descienden a 1.500 ˚C. En estas condiciones se verifica un ciclo de evaporación, condensación y precipitación no para el agua, ¡sino para metales como el hierro! Los fuertes vientos, producidos por la gran diferencia de temperatura entre el hemisferio diurno y el nocturno, hacen el resto, transportando los vapores de hierro hacia la cara más fría, donde luego se condensan para llover en forma de gotas de hierro fundido, en particular en las proximidades del límite nocturno entre los dos hemisferios. Si esto no es el infierno, no andamos muy lejos.

NOCTURNO (CON *SPOILER ALERT)*

En 1941, el célebre escritor de ciencia ficción ruso nacionalizado estadounidense Isaac Asimov (1920-1992) escribió un relato, titulado *Anochecer (Nightfall),* en que suponía la existencia de un planeta perteneciente a un sistema estelar séxtuple, o sea, compuesto por seis estrellas. En este planeta —denominado Lagash— la oscuridad era desconocida, porque al menos una estrella de las seis estaba siempre en el horizonte. Solo en algunas, rarísimas, circunstancias, con cinco estrellas ocultas y solo una iluminando el planeta, ocurría que una luna (desconocida, porque era invisible de día, pero localizada hipotéticamente gracias a la teoría de la gravitación universal, como Neptuno) pasaba a eclipsar esta estrella sumiendo al planeta en la oscuridad.

[Inicio *spoiler:* si no conocéis el relato, no leáis las próximas líneas.] El eclipse duraba un tiempo limitado, media jornada, pero suficiente para enloquecer a los habitantes de Lagash hasta el punto de que acaban destruyendo su civilización. [Fin *spoiler:* ¡ahora corred a leer el relato!]

Los astrónomos aún no han descubierto ningún planeta extrasolar que orbite en un sistema semejante, pero, aunque es difícil (probablemente las órbitas planetarias serían extremadamente inestables), no se descarta que antes o después se localice también un exoplaneta como Lagash (cuyo nombre, por cierto, recuerda una antigua ciudad-estado, primero sumeria, luego babilonia, de la que solo han quedado algunas ruinas).

Por otra parte, existen muchas estrellas múltiples, incluidas algunas estrellas séxtuples. Una de ellas, por ejemplo, es conocida desde la antigüedad porque es visible a simple vista. Se trata de la estrella **Cástor,** alfa Geminorum, una de las dos estrellas principales de la constelación de Géminis (la otra es Pólux, beta Geminorum: juntas,

estas dos estrellas representan las cabezas de los mitológicos Dioscuros, los gemelos hijos de Zeus y Leda, reina de Esparta, ante la que Zeus, para seducirla, se presentó en forma de cisne). Aquí tenemos un sistema de tres estrellas, cada una de las cuales es, en realidad, un sistema binario, compuesto justamente por dos estrellas. No es difícil, pues, imaginar lo que ya imaginó Asimov en su relato, o sea, que, en un hipotético planeta perteneciente a este sistema, la plena oscuridad no se produce nunca porque al menos una de las seis estrellas está siempre en el horizonte.

Imaginaos vivir en un planeta semejante, donde la noche no cae nunca y los días se tiñen de colores diversos según los tipos de estrellas que se encuentran en el horizonte. Para ver el efecto que produce, es preciso viajar durante más de 50 años luz. Una distancia que, incluso a la velocidad récord de unos 700.000 kilómetros por hora que alcanzará la sonda *Parker Solar Probe* en su recorrido orbital de acercamiento al Sol, requeriría casi 80.000 años para ser atravesada.

Digámoslo claramente: sin el motor de curvatura con el que están provistas las naves espaciales de la flota interestelar de *Star Trek* y que les permite desplazarse de una parte a otra del universo a velocidades superlumínicas, ¡la exploración del espacio resulta realmente complicada!

CAPÍTULO 12

LA VÍA LÁCTEA Y SUS AGUJEROS NEGROS

VÍA LÁCTEA

GALAXIA

Distancia del centro de la Galaxia: 27.000 años luz
Diámetro: 100.000-120.000 años luz
Espesor: 1.000 años luz
Rotación: 250 millones de años a la distancia del Sol
Masa: cerca de 1 billón (10^{12}) de masas solares
Número de estrellas: 300.000 millones ± 100.000 millones
Edad: 13.200 millones de años
Tipo de galaxia: espiral barrada
Principales satélites: Nubes de Magallanes Mayor y Menor

Si, peregrinando por los planetas extrasolares, pensabais que habíais alcanzado quién sabe qué distancias, nos sentimos en el deber de informaros de que, pese a que estas distancias sean enormes, aún estamos claramente en el interior de nuestra «casa» en el universo: nuestra Galaxia, más conocida como Vía Láctea.

Desde la Tierra podemos hacernos una idea de qué sería encontrarnos bajo un cielo sin nubes, oscuro y transparente. Un cielo estrellado es siempre un espectáculo maravilloso: miles de puntos luminosos y centelleantes que hacen guiños desde un fondo negrísimo, dispuestos según figuras geométricas que en el curso de los siglos han inspirado la fantasía de filósofos, poetas, navegantes y, naturalmente, astrónomos. Pero el fondo sobre el que vemos brillar las estrellas es solo aparentemente negrísimo. En las noches oscuras y sin Luna es posible percibir una franja luminosa que atraviesa de un lado a otro todo el cielo, a veces constriñéndose, a veces ensanchándose: es la Vía Láctea. Su luz está compuesta por la radiación de miríadas de estrellas

lejanas que nuestros ojos no consiguen distinguir; pero un pequeño telescopio de aficionado ya es capaz de mostrar los espléndidos campos estelares de la Vía Láctea en toda su magnificencia. Ahora estamos listos, en nuestro crucero interestelar, para recorrer esta «carretera de luz» que ilumina el cielo nocturno.

LA LECHE DE HERA

Según la mitología griega, la Vía Láctea se formó con gotas de leche esparcidas del seno de Hera, mujer de Zeus, mientras amamantaba a Heracles (Hércules, en la mitología romana). Se narra que Zeus, siempre a la caza de muchachas, había elegido a la bella Alcmena para procrear un hijo fortísimo: justamente, Heracles. Pero Alcmena, temiendo la ira de Hera, abandonó a su hijo. Instigada por Zeus, Atenea condujo a Hera donde estaba el recién nacido y la convenció para que lo amamantara. Hera, que no sospechaba ningún engaño, sintió piedad, pero cuando Heracles se aferró con excesiva fuerza al seno de la diosa, esta, gimiendo de dolor, lo alejó de golpe, asombrada. Entre tanto un chorro de leche caía en el suelo transformándose en lirio, mientras otro chorro acababa en el cielo, transformándose en la Vía Láctea. Pero Zeus había obtenido lo que quería: la inmortalidad de Heracles, saciado con la leche de Hera. En realidad existen otras versiones del mismo mito, pero todas hacen referencia a la leche vertida por Hera en el acto de amamantar a Heracles.

Queda así explicado el origen del nombre Vía Láctea, proveniente del latín *Via Lactea,* a su vez derivado del término griego Γαλαξίας, *Galaxias,* cuya raíz es la palabra γάλα, *gala,* que significa «leche». Así, se diga Vía Láctea o se diga Galaxia, se usan siempre términos que remiten al mito griego y al origen de la maravillosa franja lechosa que atraviesa el cielo nocturno gracias a una salpicadura de leche. Parafraseando un antiguo dicho, dan ganas de afirmar que nunca la leche fue vertida con mayor provecho.

NUESTRA CASA EN EL UNIVERSO

Como hemos anticipado, la Vía Láctea es nuestra casa en el universo: es la galaxia a la que pertenece el Sol con su sistema planetario. Ahora bien, no nos confundamos: cuando decimos «casa» no queremos decir un pequeño apartamento, ni aun menos un estudio, sino una hermosa y amplia villa llena de habitaciones —como hemos podido comprobar visitando una pequeñísima porción de planetas extrasolares— y dotada de un sistema de iluminación literalmente «estelar».

La Vía Láctea, cuyo nombre oficial es Galaxia, con G mayúscula, al ser nuestra galaxia por excelencia, es un sistema estelar unido por la fuerza de gravedad, en que toda la masa —estrellas, gases, polvo, materia oscura— orbita en torno al centro del propio sistema. Y el Sol, o sea, una de las innumerables estrellas que pueblan la Galaxia, no escapa de esta sencilla regla.

Nuestra Galaxia tiene forma de espiral, semejante a la de muchas otras galaxias, con un disco aplastado sobre el cual se desarrollan los brazos espirales (para ser rigurosos, en realidad es una espiral barrada, porque los brazos en espiral no parten directamente del bulbo central, sino de dos prolongaciones contrapuestas de estrellas que los astrónomos llaman «barra»). Pero, por desgracia para nosotros, es inviable ver directamente esta forma, que solo ha podido ser determinada a través de observaciones radioastronómicas indirectas sobre la posición y la velocidad de las nubes de hidrógeno neutro: el Sol se encuentra en el interior del disco, y también bastante en la periferia. Este es el motivo por el cual lo que vemos de la Galaxia son las estrellas de nuestras inmediaciones, distribuidas de manera sustancialmente uniforme en todo el cielo, y una franja luminosa e indistinguible de las estrellas y polvo que atraviesa el cielo, la Vía Láctea, justamente, que no es más que el disco de nuestra Galaxia observado desde nuestro particular punto de vista. Es un simple efecto de perspectiva debido a la forma aplastada de nuestra Galaxia.

Las pruebas que demuestran que nuestra Galaxia tiene una estructura en espiral, derivadas de mediciones radioastronométricas, son bastante recientes: se remontan a la segunda mitad del siglo pasado. Y aunque en 1785 William Herschel ya había intentado trazar un mapa que retrataba la forma de nuestro sistema estelar, hasta más o menos los años veinte del siglo pasado no fue posible comprender que el Sol no solo no era el centro del universo, sino que ni siquiera era el centro de la Galaxia.

LA ESTRUCTURA DE LA GALAXIA

El Sol es solamente una de las más de 200.000 millones de estrellas (es solo una estimación, ¡podrían ser incluso el doble!) que pueblan nuestro sistema estelar. Además de este increíble número de estrellas, la Galaxia está abundantemente poblada de cúmulos estelares, nebulosas, gases y polvo interestelar.

Como cualquier otra galaxia espiral, es un sistema esencialmente aplastado compuesto por un **disco** de espesor reducido y por un abultamiento central, llamado **bulbo** *[bulge* en inglés]. De este núcleo central (si hablamos de las galaxias espirales normales; de una **barra**

en el caso de las barradas, precisamente como la nuestra) parten los llamados **brazos espirales,** distribuidos en el disco de la Galaxia, mientras que, ocupando un volumen esférico que envuelve todo el disco —pero mucho menos densamente poblado—, encontramos el **halo,** en que viejas estrellas aisladas y cúmulos globulares atestiguan la edad de nuestro sistema estelar. El diámetro de la Galaxia es de unos 100.000 años luz, mientras que en el punto de su máximo espesor el bulbo (la parte más espesa del disco) está extendido solo un trigésimo de diámetro, o sea, unos 3.000 años luz. El resto del disco tiene un espesor de cerca de 1.000 años luz.

El centro de la Galaxia se encuentra en la dirección de la constelación de Sagitario. Por desgracia, este nos es invisible, como muchas otras zonas de nuestra Galaxia, a causa de la presencia de densas nubes de materia interestelar que oscurecen la luz emitida por las estrellas que se encuentran detrás. Algunos amplios regueros oscuros de polvo (los llamados **sacos de carbón)** son fácilmente visibles para el ojo humano en contraste con el fondo luminoso de estrellas de la Vía Láctea que, observado en el telescopio, exhibe toda su increíble belleza: ¡la que a simple vista aparece como una franja luminosa continua se disuelve en miríadas de estrellas que pueblan campos estelares densísimos!

La Galaxia gira sobre sí misma de manera diferencial, o sea, a diversas velocidades según la distancia: el Sol, situado a una distancia de unos 27.000 años luz del centro, gira a una velocidad de 220 kilómetros por segundo y emplea unos 225 millones de años en realizar una rotación completa: esta última cantidad es llamada «año cósmico». El estudio de la curva de rotación de la Galaxia —o sea, del gráfico que muestra las velocidades orbitales de las estrellas respecto a su distancia del centro galáctico— demuestra que en su interior contiene mucha más materia que la que es visible. De hecho, el 90% de la masa de la Galaxia está compuesto por **materia oscura** que se manifiesta solamente a través de sus efectos gravitatorios.

Aparte de los cuerpos del Sistema Solar, el resto de los objetos celestes visibles para el ojo humano son estrellas pertenecientes a la Galaxia, con la única salvedad de algunas galaxias externas que, dada la enorme distancia, aparecen como astros individuales, aunque compuestos por centenares de miles de millones de estrellas como la nuestra.

CUIDADO CON LOS BACHES... ¡GRAVITATORIOS!

Recorriendo la Vía Láctea, puede que nos encontremos con algunos problemas, no relacionados con el tráfico, naturalmente, sino con los

posibles «baches». En general, el «camino» está bien iluminado por las estrellas que encontramos en torno, pero no es descartable que algún bache a lo largo del trayecto no esté señalado. Ahora bien, los baches de los que hablamos son muy distintos de los de las calles de nuestras ciudades, y están entre los objetos más misteriosos del cosmos: los agujeros negros. Estos, si no tienen algunas estrellas alrededor para señalarnos su presencia, ¡pueden ocultarse a nuestra vista y son dificilísimos, si no imposibles, de percibir en la oscuridad cósmica!

Pero, por suerte, algunos agujeros negros están en compañía de otras estrellas, en el sentido de que forman parte de sistemas binarios. En este caso sucede que la estrella cede parte de su masa al agujero negro, que la deglute ávidamente. Fue precisamente la posibilidad de observar el proceso que lleva a la masa de la estrella a caer en el agujero negro —en particular, gracias a la radiación X emitida por la materia en caída, distribuida en un disco de acreción que envuelve el agujero negro— lo que hizo posible el descubrimiento de los agujeros negros estelares, algunos de los cuales se encuentran también en nuestra Galaxia. Afortunadamente ninguno de ellos está tan cerca de nosotros como para representar una amenaza para la supervivencia de la Tierra o del Sistema Solar.

Entre los sistemas binarios candidatos a alojar un agujero negro, el primero que fue descubierto, en 1964, fue **Cygnus X-1,** o sea, la fuente de rayos X más luminosa de la constelación del Cisne. Este sistema, con un período orbital de unos cinco días y medio, está compuesto por una estrella azul muy caliente y de grandes dimensiones y por una secundaria invisible, un objeto extremadamente compacto cuya masa estimada es de varias masas solares (las últimas estimaciones le atribuyen unas 20 masas solares). Ubicada a una distancia de más de 6.000 años luz, si la secundaria fuera una estrella normal, sería también fácilmente visible. Su invisibilidad, la intensa emisión X producida por el sistema y, finalmente, la estimación de la masa hacen pensar a la mayoría de los astrónomos que estamos ante el primer caso verificado de agujero negro estelar.

Pero, de ser realmente así, no os aconsejamos ir a verlo de cerca, porque, por más que la visión pueda ser sin duda espectacular, ¡podría sucederos algo muy, pero muy feo! La intensidad del campo gravitatorio en las proximidades de un agujero negro es tal que incluso solo entre vuestra cabeza y vuestros pies habría tanta diferencia en la fuerza de atracción que seríais literalmente «estirados» y «alargados» por el campo (y no debe de ser una muerte bonita, aunque sea rápida). Los astrofísicos llaman a este proceso

«espaguetización», palabra que expresa muy elocuentemente el efecto resultante. Y no penséis que en vuestra nave encontraréis refugio: ¡no existe ningún material capaz de resistir a estas fuerzas!

El encuentro con un agujero negro estelar podría ya haber satisfecho vuestra curiosidad al respecto, pero a nuestra Galaxia no le falta de nada, y además de agujeros negros estelares, tiene en el centro también su bonito agujero negro supermasivo, **Sagittarius A*,** descubierto gracias al estudio de los movimientos de las estrellas cercanas al centro de la Galaxia y de la intensa emisión de rayos X (y gamma, pero también radio) procedente de las zonas más internas del bulbo. Un agujero negro supermasivo —ya lo dice la palabra— es un objeto que tiene una masa extremadamente grande concentrada en un volumen limitado: en el caso de Sagittarius A*, que dista unos 27.000 de años luz de nosotros en dirección a la constelación de Sagitario, donde justamente se encuentra el centro de nuestra Galaxia, la masa estimada es de unos 4 millones de masas solares. Ahora solo os queda imaginar la magnificencia de tal objeto y el increíble espectáculo al que un astroturista puede asistir acercándose —a distancia de seguridad, se entiende— a semejante agujero negro. Lástima que en los catálogos de las agencias de viajes interestelares no aparezcan nunca los cruceros hacia el centro de la Galaxia y que los pocos exploradores que se han aventurado en esa dirección no hayan vuelto para contarnos cómo les ha ido... Preferimos no imaginarlo.

QUÉ ES UN AGUJERO NEGRO

El nombre «agujero negro» (en inglés, *black hole)* fue acuñado en 1967 por el astrofísico teórico estadounidense John Archibald Wheeler (1911-2008) para referirse a un cuerpo celeste cuya gravedad era tan intensa que no dejaba escapar ni siquiera la luz. Por eso fue definido como «negro»: porque no emite luz. Este es el motivo de tanto misterio: puesto que los agujeros negros no son luminosos, no podemos verlos nunca directamente y estamos obligados a buscarlos y estudiarlos solo basándonos en los indicios indirectos que su presencia deja en el ambiente circundante. En otras palabras, si un agujero negro se come a una estrella, nosotros no «vemos» el agujero negro, pero podemos observar los efectos devastadores de su intenso campo gravitatorio, como en el caso de Cygnus X-1 o de Sagittarius A*.

Precisamente por esta característica fundamental, nunca tendremos la posibilidad de identificar un agujero negro aislado en el espacio. Son solo los efectos sobre las estrellas y sobre la materia que lo rodean los que nos proporcionan indicios sobre la posible presencia de uno de estos objetos. Para explicar este concepto, John Wheeler propuso una

curiosa analogía: supongamos que nos encontramos en una sala de baile escasamente iluminada donde las mujeres están todas vestidas de blanco y los hombres, en cambio, llevan trajes oscuros. Las primeras serán visibles, mientras que los segundos serán unas sombras imperceptibles. Así, mientras miramos bailar a las parejas, veremos a las mujeres siguiendo una coreografía que nos hará intuir con facilidad la presencia de las parejas masculinas, aunque sean invisibles.

Fue Einstein quien explicó la imposibilidad de la luz de huir de un agujero negro en términos de deflexión de la luz por parte de un campo gravitatorio. En la práctica, en las cercanías de un agujero negro, el espacio-tiempo está tan encorvado que también las trayectorias de los rayos luminosos se repliegan sobre sí mismas sin escapatoria. Así, por ejemplo, para transformar el Sol en un agujero negro deberíamos concentrar toda su masa en una esfera de unos 3 kilómetros de radio, ¡mientras que la Tierra se transformaría en un agujero negro solo si se convirtiera en una bolita con un radio de apenas 9 milímetros!

Si, recibidas todas estas advertencias, queréis emprender, de todos modos, un viaje hacia un agujero negro, esperemos que hayáis comprendido que el viaje es solo de ida. En torno al agujero negro existe una región, delimitada por el llamado «horizonte de sucesos», superada la cual ya no es posible volver atrás. Lo curioso es que, espaguetización aparte, no os percataríais de estar atravesando este confín, mientras que vuestros compañeros de viaje, tal vez fuera para presenciar vuestra zambullida mortal, os verían acercaros indefinidamente al horizonte para luego deteneros allí, y literalmente no asistirían a vuestra caída. Bromas de la teoría de la relatividad general.

Por cierto, entre estas bromas podemos incluir también las **ondas gravitatorias,** de cuya existencia solo recientemente se ha tenido por fin la confirmación directa, gracias a las observaciones con instrumentos —llamados «antenas» o «interferómetros gravitatorios»— expresamente diseñados con este propósito. La teoría de la relatividad prevé que, por ejemplo, un sistema binario estricto compuesto por estrellas compactas —como una estrella de neutrones y un agujero negro, o dos agujeros negros, justamente— emita ondas gravitatorias a expensas de la energía total del propio sistema. Las ondas gravitatorias son representables como «arrugas» temporales en el tejido espaciotemporal, que a su paso varía su propia curvatura. El paso de una onda gravitatoria es, por tanto, percibido por un cuerpo como una pequeña variación local de la curvatura del espacio-tiempo, y es

precisamente lo que «miden» los interferómetros gravitatorios. De manera que ahora disponemos de un método para descubrir los agujeros negros, aunque no se vea ninguna emisión electromagnética: ¡lo importante es que estén en un sistema binario y decidan fundirse juntas!

LOS ALREDEDORES DE NUESTRA GALAXIA

Nuestra Galaxia no vaga aislada por el universo. En nuestras «inmediaciones» se encuentran varias galaxias, que componen un pequeño cúmulo llamado **Grupo Local.**

De las cerca de ochenta galaxias del Grupo Local, las más importantes, además de la nuestra, son la **galaxia de Andrómeda** (M31) y la **galaxia del Triángulo** (M33), ambas espirales, como la nuestra, distantes de nosotros más de 2,5 millones de años luz. Mucho más cercanas, a unos 200.000 años luz, están las **Nubes de Magallanes Mayor** y **Menor,** dos pequeñas galaxias irregulares satélites de la nuestra. Por tanto, ha llegado el momento de emprender definitivamente el vuelo y salir de nuestra «casa» para visitar los otros «universos isla» (por utilizar las palabras del filósofo alemán Immanuel Kant [1724-1804]) que pueblan el cosmos.

Desde ahora nuestros viajes ya no serán interplanetarios, ni interestelares, sino intergalácticos. Y las distancias que habrá que recorrer serán aún más extremas. Pero quién dijo miedo: mochila al hombro y adelante. Nos vemos en la galaxia de Andrómeda.

CAPÍTULO 13

VIAJES INTERGALÁCTICOS

CÚMULOS DE GALAXIAS

Cúmulo de galaxias a la que pertenece la nuestra: Grupo Local
Número de galaxias del Grupo Local: unas 80
Miembros principales del Grupo Local: Vía Láctea, galaxia de Andrómeda, galaxia del Triángulo
El Grupo Local forma parte de: cúmulo de Virgo
Número de galaxias en el cúmulo de Virgo: 1.200-2.000
Distancia del centro del cúmulo de Virgo: 54 millones de años luz
Masa del cúmulo de Virgo (Sol = 1): mil billones

El Sol y su cortejo de planetas, entre otros la Tierra, se encuentran inmersos en un sistema estelar, nuestra Galaxia, de cuya estructura compleja solo es posible hacerse una idea a través de observaciones indirectas, como hemos visto.

Pero si quisiéramos solo imaginar cómo podría aparecer nuestra Galaxia en el caso de que consiguiéramos observarla desde lejos, podemos buscar en el cielo uno de los objetos celestes más estudiados por los astrónomos: la gran **galaxia de Andrómeda.**

Visible a simple vista —pero solo con el cielo absolutamente oscuro y con el ojo perfectamente adaptado a la oscuridad— como una tenue «bolita de luz», esta galaxia espiral se parece verdaderamente mucho a la nuestra, tanto que casi podríamos definirla como la gemela de la Vía Láctea. Por eso los astrónomos siempre la han estudiado con especial atención. Y entonces ¿por qué no intentamos apartarnos del disco de nuestra Galaxia para apuntar hacia Andrómeda? Así, durante el viaje, podremos de vez en cuando mirar atrás y ver la enorme

espiral de estrellas en que hemos nacido y hemos vivido siempre, hasta que, un día, tomamos la decisión de explorar también otras galaxias.

NUESTRA «VECINA DE ENFRENTE»

Dado que dista de nosotros más de 2 millones y medio de años luz, es decir, algo así como 25 billones de kilómetros, la galaxia de Andrómeda es el objeto celeste más lejano que nuestros ojos son capaces de percibir sin ninguna ayuda instrumental. Este hecho aún resulta más fascinante si pensamos que la luz que llega ahora a nosotros partió de allí hace más de 2 millones y medio de años, justamente, ¡cuando nuestra especie aún debía hacer su aparición en la Tierra!

Nuestra Galaxia y la de Andrómeda son los componentes principales de un pequeño grupo compuesto por unas ochenta galaxias y denominado **Grupo Local** (aunque la mayor parte son galaxias enanas). En efecto, la galaxia de Andrómeda no es la más cercana a nosotros —las Nubes de Magallanes Mayor y Menor se encuentran ambas a menos de 200.000 años luz de distancia de nosotros, o sea, a una distancia más de diez veces inferior a aquella a la que se encuentra la galaxia de Andrómeda (y hay galaxias enanas aún más próximas)—, pero es seguramente el sistema extragaláctico más importante en nuestras «inmediaciones», hablando en sentido astronómico, naturalmente.

Precisamente por su increíble semejanza con nuestra Galaxia y por su extrema cercanía, la de Andrómeda es una de las galaxias más observadas y mejor conocidas del universo, a lo que hay que añadir que su estudio permite comprender mejor la estructura y la distribución de estrellas de nuestra Galaxia, que solo podemos estudiar desde un punto de vista interno y periférico.

Pero no solo eso: la medición de la distancia de la galaxia de Andrómeda ha representado un paso fundamental para la determinación de las distancias cósmicas. Si ahora sabemos lo grande que el universo, se lo debemos también un poco a ella: fue el primer objeto celeste del que se descubrió su naturaleza extragaláctica. Sí, porque antes de los años veinte del siglo pasado, se suponía que objetos como la galaxia de Andrómeda, en esa época conocidos con el nombre de «nebulosas espirales», pertenecían a nuestra Galaxia. Y ahora sabemos que la galaxia de Andrómeda está muy lejos de nosotros, pero también que se está acercando a gran velocidad. De todos modos, no tenemos nada que temer, al menos de momento: las dos galaxias llegarán a cruzarse —y no necesariamente a encontrarse

— ¡dentro de unos 5.000 millones de años!

LA «COMPAÑÍA DE LA GALAXIA»

Saliendo de los «restringidos» límites de nuestra Galaxia, nos encontramos frente a una situación increíble: la Galaxia vista desde el exterior, con su estructura espiral y con el Sol inmerso en una miríada de otras estrellas, y, todo en torno a nosotros, en vez de estrellas, podemos observar muchísimas otras galaxias, algunas más cercanas y luminosas (y de dimensiones aparentemente mayores), otras poco a poco más alejadas, que nos parecen no ya puntiformes como las estrellas, sino pequeñas «bolitas de luz». Nuestro cielo ahora está constelado de otros sistemas estelares, algunos similares al nuestro, otros de aspecto y dimensiones diferentes.

Todas las galaxias del Grupo Local están reunidas en una porción de espacio relativamente pequeña: se encuentran distribuidas en una esfera de un diámetro aproximado de unos 10 millones de años luz. A pesar de su relativa proximidad, muchas de ellas son galaxias enanas, algunas de tipo elíptico, otras irregulares.

Además de nuestra Galaxia y la de Andrómeda, el tercer componente principal es la **galaxia del Triángulo** (M33). Se trata de una galaxia espiral de un tipo distinto tanto de la nuestra como de la de Andrómeda: tiene una condensación nuclear muy pequeña y brazos espirales abiertos y rarefactos. Como es típico observar en esta categoría de galaxias, en M33 se detecta una notable tasa de formación estelar, naturalmente a lo largo de los brazos en espiral, donde por lo general está distribuida la mayor parte de la materia interestelar de la galaxia y en los que se pueden observar muchas condensaciones luminosas fácilmente interpretables como zonas en que se encuentran estrellas jóvenes y muy cálidas.

Por desgracia, desde nuestras latitudes es imposible observar las dos Nubes de Magallanes. La **Nube Mayor de Magallanes** está en la constelación de la Dorada (clásicamente representada por un pez espada, aunque la palabra portuguesa *dorado* se refiere a un gran pez llamado «lampuga» que no tiene «espada»), mientras que la **Nube Menor de Magallanes** se encuentra en el Tucán, dos constelaciones del hemisferio celeste austral. A pesar de que el nombre permita suponer que las dos galaxias irregulares satélites de la nuestra fueron descubiertas por el navegante portugués Fernando de Magallanes (1480-1521), ambas ya eran conocidas desde la antigüedad por los habitantes del hemisferio austral, dado que eran perfectamente observables a simple vista. El primero que las mencionó fue el astrónomo persa Abd al-Rahman al-Sufi (903-986), en 964, en su *Libro*

de las estrellas fijas. Magallanes, que las observó en 1519 durante su viaje de circunnavegación del globo terrestre, fue, sin embargo, el primero en describirlas, aunque algunos estudiosos suponen que en la representación del cielo austral que figura en una carta de 1502 dirigida por Amerigo Vespucci (1454-1512) a Lorenzo de Pierfrancesco de Médicis, el navegante florentino se refiere con la expresión «Canopos [...] brillantes» precisamente a las dos Nubes de Magallanes.

EL INCONSCIENTE DESCUBRIMIENTO DE MESSIER

Más allá del Grupo Local, cuyas dimensiones son ya de algunos millones de años luz, las distancias se vuelven enormes, y el primer cúmulo de galaxias que hallamos saliendo del Grupo Local es el cúmulo de Virgo, cuyos miembros distan de nosotros varias decenas de millones de años luz y que es llamado así porque se encuentra justamente en la constelación de Virgo. Es bastante prolífico, porque en su interior se cuentan unas 2.000 galaxias, cuya distancia media de nosotros es de unos 60 millones de años luz. Esta relativa cercanía hace que muchas de sus galaxias, y en cualquier caso las principales, sean fácilmente observables con un simple telescopio de aficionado.

No es casual que este haya sido el primer cúmulo descubierto: fue el astrónomo francés Charles Messier (1730-1817), célebre por su catálogo de objetos nebulares (que enumeró para evitar confundirlos con posibles cometas, a los que él daba caza) —conocido justamente como catálogo Messier y publicado por primera vez en 1774—, quien anotó en 1781, en referencia al descubrimiento de la galaxia espiral M91 (sí, ahora habéis entendido qué significa esa M delante del número; ¡es la inicial de Messier!), que «la constelación de Virgo y especialmente la zona septentrional es una de las constelaciones que reúne más nebulosas». Con posterioridad Messier descubrió otras «nebulosas» en la zona, por lo que el total de los objetos nebulares de esa zona de cielo —a caballo entre las constelaciones de Virgo y la Cabellera de Berenice— presentes en su catálogo ascendía a dieciséis. Este hecho condujo a Messier a reconocer que había observado un cúmulo de nebulosas, al menos un siglo y medio antes de que se comprendiera la verdadera naturaleza de las galaxias y, por tanto, se entendiera que aquello que el francés observó era un verdadero cúmulo de galaxias recíprocamente ligadas por la gravitación.

LA PRIMERA «FOTOGRAFÍA» DE UN AGUJERO NEGRO

Entre los objetos nebulares del catálogo Messier destaca sin duda la

galaxia M87, una elíptica gigante que domina el cúmulo de Virgo y es ciertamente una de las mayores galaxias conocidas. Objetivo privilegiado de los astrónomos a causa de su relativa cercanía a nosotros, aloja un **agujero negro supermasivo** con una masa estimada en torno a 6.500 millones de veces la de nuestro Sol. Sí, habéis leído bien: 6.500 millones, una exageración. En efecto, es uno de los agujeros negros más masivos que se conocen. En comparación con este, el agujero negro supermasivo de nuestra Galaxia es de verdad minúsculo.

Este agujero negro, que se encuentra en el centro de la galaxia, hace que los fenómenos que se verifican en el núcleo de M87 sean especialmente energéticos, hasta el punto de que esta galaxia se incluye entre las galaxias activas, además de que exhibe también una intensa emisión de rayos X y de radio (de ahí el nombre de Virgo A, o sea, la radiofuente más intensa de Virgo). Desde el centro de M87 emerge un chorro de materia que se extiende, al menos, 5.000 años luz. Este chorro contiene la materia eyectada por el disco de acreción constituido por la materia en órbita alrededor del agujero negro supermasivo. Este agujero negro es el primero y, por el momento, también el único que ha sido fotografiado. Bueno, a decir verdad, no es exactamente una fotografía tradicional, sino una imagen muy complicada de obtener. En efecto, los datos para producir la imagen fueron recogidos en 2017, pero la «fotografía» no fue publicada hasta 2019, después de un largo y complejo proceso de elaboración. De todos modos, ahora podemos escribir que hemos conseguido inmortalizar un agujero negro, o, mejor, su sombra, con su enorme disco de acreción y todos los efectos asociados a la deformación del espacio-tiempo en sus cercanías.

Muchas otras galaxias, además de M87, se caracterizan por una intensa emisión que se extiende sobre un amplio intervalo de longitudes de onda (de las ondas de radio a los rayos X) proveniente del núcleo, la parte central del bulbo. Son los llamados **núcleos activos de galaxias,** o **AGN** por sus siglas (del inglés, *active galactic nuclei),* en los que, al menos según el modelo teórico más acreditado, un agujero negro supermasivo está centrado en atraer y captar irreversiblemente toda la materia que orbita a su alrededor cayendo hacia el interior a lo largo de un disco de acreción.

La increíble luminosidad de los núcleos de estas galaxias, denominadas «galaxias activas», es a menudo muy superior a la del resto de la galaxia. Es, por ejemplo, el caso de los **QSO** *(quasi-stellar object,* «objeto de aspecto casi estelar»), objetos que distan miles de millones de años luz y que se vuelven visibles precisamente por esta

intensísima radiación. Ahora sabemos que los QSO, entre los que se incluyen también los **cuásares,** caracterizados por emisión de radio muy potente, son precisamente núcleos de galaxias activas de los que, a causa de la distancia, es prácticamente imposible ver el resto, cuya luminosidad es evidentemente más débil.

Los cuásares, pero en general los objetos muy distantes, pueden ser protagonistas de verdaderos «espejismos cósmicos» causados por la deflexión de la luz, prevista por la teoría de la relatividad general. En efecto, una de las previsiones de esta teoría, demostrada experimentalmente pocos años después de su enunciación, es la deflexión de los rayos de luz por obra del campo gravitaotorio. La medición fue realizada por primera vez en 1919 por el astrofísico inglés Arthur Eddington (1882-1944), en ocasión de un eclipse total de Sol, observando las posiciones aparentes de algunas estrellas de fondo en las proximidades del disco solar ocultado por la Luna y comparándolas con las respectivas posiciones adoptadas seis meses después, cuando esas mismas estrellas se encuentran del lado opuesto del Sol respecto de la Tierra y pueden ser observadas de noche.

Pero la deflexión de la luz está también en el origen del fenómeno de las **lentes gravitatorias:** cuando a lo largo de la línea de visión entre nosotros y una fuente lejana se encuentra una galaxia o también un cúmulo de galaxias, la luz de la fuente lejana sufre una deflexión más o menos intensa a causa de la presencia de esa gran masa. El resultado es que la fuente lejana (un cuásar, una galaxia, etc.) es observada deformada y a veces incluso multiplicada. La lente gravitatoria —justamente la masa de la galaxia o del cúmulo de galaxias a lo largo de la línea de visión— puede desviar de manera diferente la luz según la distribución de su masa, e incluso producir imágenes múltiples de la misma fuente lejana.

Es lo que ocurre, por ejemplo, en el caso de la **Cruz de Einstein,** la imagen múltiple y deformada de un cuásar distante situado casi exactamente detrás de una galaxia más cercana. El efecto resultante es desconcertante, habida cuenta de que ninguno de los objetos que se ven en la imagen es el verdadero cuásar, que está a unos 8.000 millones de años luz de distancia, oculto a la vista precisamente por la galaxia, situada a apenas 400 millones de años luz.

EN EL REINO DE LA GRAVEDAD

A las galaxias no les agrada vagar solas por el universo. Gracias a la recíproca atracción ejercida por la fuerza de gravedad, las galaxias tienden a juntarse, formando unas veces pequeños grupos de algunas decenas de ellas y otras veces cúmulos o supercúmulos, con miles de

galaxias concentradas en una relativamente restringida porción de espacio (¡siempre hablando de distancias enormes!).

El **supercúmulo de Virgo** es un supercúmulo de galaxias que contiene nuestro Grupo Local y, en el interior de este, nuestra Galaxia. En un volumen de un diámetro de unos 100 millones de años luz contiene cerca de 100 entre grupos y cúmulos de galaxias, y adopta el nombre de cúmulo de Virgo, que se encuentra cerca de su centro. El Grupo Local se halla en la periferia del supercúmulo, y se mueve lentamente hacia su centro, atraído por la enorme masa del cúmulo de Virgo, cuyos efectos gravitatorios se hacen sentir a gran escala, ralentizando y atrayendo a las galaxias cercanas. Estudiando el movimiento de las galaxias en el interior del supercúmulo es posible estimar su masa total, equivalente a cerca de 1.500 billones de masas solares. Pero la luminosidad total de las galaxias pertenecientes al supercúmulo es demasiado baja para percatarse de esta cifra, razón por la cual se piensa que gran parte de su masa está compuesta de materia oscura.

Hasta hace algunos años, el Supercúmulo de Virgo era llamado también **supercúmulo Local,** en analogía con el nombre del Grupo Local. En realidad, estudios más recientes han descubierto que el mismo supercúmulo de Virgo no es más que un apéndice de un supercúmulo aún más grande llamado **Laniakea,** palabra hawaiana traducible con la expresión «cielos inconmensurables». En efecto, si ya nos espantaban las distancias entre las estrellas, o entre las galaxias más cercanas, aquí nos movemos en dimensiones enormes y difícilmente imaginables. El Supercúmulo de Laniakea aloja más de 100.000 galaxias (¡incluida la nuestra!), dispuestas en un volumen de más de 520 millones de años luz.

Para entendernos, hasta la luz, que viaja a 300.000 kilómetros por segundo, emplea más de 500 millones de años para atravesarlo. Si una civilización alienígena nacida en una galaxia en el extremo de Laniakea decidiera ahora enviarnos un mensaje, este nos llegaría quizá cuando nuestra civilización llevara mucho tiempo extinguida. Y en todo caso, si no lo estuviera, recibiéramos el mensaje y decidiéramos responder, el viaje de ida y vuelta emplearía más de mil millones de años. Una fracción no irrelevante de toda la vida del universo, estimada en torno a 13.800 millones de años.

NÚMEROS QUE SUPERAN LO IMAGINABLE

Ahora sabemos que el Universo está lleno de galaxias. Los astrónomos calculan que más de 100.000 millones, pero hay también quien sostiene que son muchas más. La nuestra es una de tantas, típica, de

tamaño medio, sin ninguna característica particular que la haga especial (aparte del hecho de que nos aloja a nosotros, naturalmente). Pero ¿cómo están distribuidas todas estas galaxias en el espacio? ¿Lo ocupan de manera homogénea o están dispuestas de manera más compleja y articulada?

Para descubrir cuál era la distribución a gran escala de las galaxias fue obviamente necesario proceder a la catalogación del mayor número de ellas posible. Los pioneros de las actividades de sondeo sistemático del cielo a la caza de nebulosas y galaxias —en la época aún no se conocía la diferencia— pata catalogarlas fueron dos viejos conocidos nuestros, el astrónomo Friedrich Wilhelm Herschel y su hijo John, autor del *General Catalogue of Nebulae and Clusters* (GC), publicado en 1864 y que contiene más de 5.000 objetos nebulares, de los cuales más de 4.600 habían sido descubiertos por él y por su padre. Con decir que aún hoy se emplea el *New General Catalogue* (el de la famosa sigla NGC), revisión y complemento del GC realizada por el astrónomo danés John Louis Emil Dreyer (1852-1926) en 1888, se entiende lo excepcional que fue el trabajo de los Herschel.

Fue precisamente John Herschel, en pleno proceso de compilación de su catálogo, quien descubrió que muchas «nebulosas» estaban concentradas en una restringida zona del cielo en dirección a la constelación de Virgo (como ya había advertido Messier) y anotó que un tercio de ellas estaba contenido en un octavo de cielo. Pero no se quedó aquí, porque llegó a describir lo que luego, más de un siglo después, fue reconocido como el supercúmulo de Virgo, un sistema, según lo que había apuntado Herschel, aproximadamente esférico, cuyo centro debía de encontrarse en la condensación de galaxias de Virgo, mientras que nuestra Galaxia estaba relegada a la periferia lejana, aunque conectada con otros miembros de esta misma periferia (lo que ahora sabemos que es nuestro Grupo Local de galaxias). Lástima que John Herschel desconociera la naturaleza extragaláctica de la mayor parte de los objetos que catalogó, que tanto para él como para sus contemporáneos fueron siempre, y en cualquier caso, «nebulosas».

Recapitulando cuanto acabamos de decir, la primera estructura a gran escala que encontramos alejándonos del pequeño grupo de galaxias al que pertenece la nuestra, el llamado Grupo Local, es el cúmulo de galaxias de Virgo, del que el propio Grupo Local constituye un apéndice periférico. Por su parte, el cúmulo de Virgo se halla en las proximidades del centro de un supercúmulo, conocido como supercúmulo de Virgo, a su vez apéndice de un supercúmulo aún más vasto, el supercúmulo de Laniakea (al que se ha asignado el nombre

de supercúmulo Local).

Pero los astrónomos se han dado cuenta de que estas estructuras son muy poca cosa si se comparan con otras tampoco tan alejadas. Uno de los aspectos más interesantes que tener en consideración en el estudio de la distribución de las galaxias en el universo es que las galaxias aisladas son prácticamente inexistentes. Según las estimaciones más autorizadas, quizá menos del 1% de las galaxias se encuentra vagando solo por el espacio. El 99% de las galaxias, en cambio, está aglutinado en estructuras más o menos densas, algunas muy concentradas, como los cúmulos de galaxias particularmente prolíficos, y otras, en cambio, mucho más extensas y alargadas. Estas últimas, dependiendo de que se extiendan a lo largo de una o dos dimensiones, adoptan el nombre de «filamentos» *(filaments)* o «murallas» *(walls)*.

En el universo local, los cúmulos más prolíficos en galaxias y, por tanto, más masivos son, además del de Virgo, el **cúmulo del Centauro,** el **cúmulo de la Escuadra** (considerablemente oscurecido por el polvo galáctico), el **cúmulo de Perseo** y el **cúmulo de la Cabellera de Berenice,** enumerados en orden de distancia de nosotros y, en cualquier caso, todos comprendidos en el interior de un volumen de unos 500 millones de años luz de diámetro. El cúmulo de la Escuadra *(Norma,* en latín) está en el centro del llamado **Gran Atractor,** un cúmulo masivo de galaxias que ejerce una gran fuerza gravitatoria, hasta el punto de que induce a toda la materia comprendida en 150 millones de años luz a experimentar un flujo de masa directo precisamente hacia el mismo cúmulo de la Escuadra. En la práctica, todos estamos cayendo hacia el Gran Atractor (de ahí el nombre, suficientemente elocuente)... ¡pero por suerte no nos damos cuenta!

En el interior de este mismo volumen se desarrollan también varias murallas de galaxias, entre las que destacan la **muralla de la Cabellera de Berenice** y la **muralla del Escultor.** Todas estas *walls* están habitualmente constituidas por franjas de galaxias —de una longitud de incluso varios centenares de millones de años luz— situadas casi como puentes de conexión entre las zonas extremadamente más densas representadas por los cúmulos y por los supercúmulos de galaxias. Las murallas de galaxias se encuadran entre las estructuras más extensas que se conocen. La **muralla de Hércules-Corona Boreal,** conocida también como **Great Wall,** o sea, «gran muralla», inspirándose en la china, ¡es definitivamente la estructura más grande que se conoce en el universo observable y se extiende por casi 10.000 millones de años luz! Pero no todos los astrofísicos están

seguros de que exista.

EL YERMO CÓSMICO

Los mapas obtenidos por las diversas campañas de observación y de medición de las distancias de las galaxias muestran de manera fehaciente que los volúmenes de espacios comprendidos entre cúmulos, murallas y filamentos son vacíos de enormes dimensiones, o sea, zonas en que la población de galaxias es increíblemente poco numerosa, cuando no completamente inexistente. Estos vacíos *(voids,* en inglés) tienen varias dimensiones, de unos 30 a unos 500 millones de años luz, pero siempre presentan una forma más o menos esférica. Observación esta que los modelos cosmológicos que estudian la formación de las estructuras a gran escala deben tener muy presente.

Entre los vacíos, uno de los más famosos es el **vacío del Boyero** *(Bootes void,* en inglés) o Gran Vacío, descubierto en 1981 en dirección a la constelación del Boyero *(Bootes,* en latín). En el curso de los años dentro de este vacío se han descubierto solo algunas decenas de galaxias. Su densidad es, por tanto, notablemente más baja que la de las zonas que lo envuelven, pobladas por nada menos que tres supercúmulos de galaxias: el de Hércules, el de la Corona Boreal y el del Boyero, justamente. Con un diámetro de unos 300 millones de años luz, este vacío es uno de los más extensos de los que ya son conocidos, hasta el punto de que algunos astrofísicos lo definen como un «supervacío». Según el astrónomo estadounidense Greg Aldering (1962), este vacío es tan grande que «si la Vía Láctea hubiera estado en el centro del Vacío del Boyero, no habríamos sabido que había otras galaxias hasta los años sesenta».

Así que, para concluir vuestro (nuestro) viaje, dirigid vuestra nave espacial allí, al centro de este vacío, lejos de cualquier galaxia, en un viaje quizá no mortal, como aquel con destino al centro de un agujero negro, pero igualmente extremo, a este yermo cósmico donde una sola señal de saludo —o de SOS— puede tardar 10 millones de años en ser recibida en la galaxia más próxima. Por no hablar de que para llegar a la Tierra emplearía más de 700 millones de años. Allí, en el centro del vacío del Boyero, estáis de verdad solos. Quizá haya llegado el momento de volver a casa.

CONCLUSIÓN

DE VUELTA A CASA

Nuestro viaje al universo ha llegado a su fin. Hemos visitado los planetas del Sistema Solar y sus satélites, planetas enanos, asteroides y cometas, el Sol y estrellas de todo tipo, un muestrario de planetas extrasolares, agujeros negros estelares y supermasivos, galaxias y cúmulos de galaxias, incluso los enormes «vacíos» intergalácticos, y nos hemos maravillado de la increíble variedad de cuerpos celestes sobre los que nos hemos posado y de la extraordinaria multiplicidad de fenómenos a los que hemos asistido.

Para hacer de turistas por el cosmos hemos recorrido distancias inimaginables, pasando de la Luna, el único otro cuerpo del universo sobre el que la humanidad ha puesto el pie, a galaxias y cuásares que distan miles de millones de años luz, en un viaje no solo en el espacio, sino también en el tiempo. Porque la luz de un cuásar lejano que observamos en este momento ha partido hace miles de millones de años, cuando aún no existían ni el Sol si su sistema planetario, Tierra incluida.

Pero ¿podemos de verdad hacer los viajes que hemos descrito en las páginas precedentes? Lamentamos decepcionar a nuestros lectores, pero la respuesta es no, por desgracia. Y no es negativa solo ahora únicamente porque tal vez nos faltan las tecnologías adecuadas para poder afrontarlos. No, la respuesta será siempre negativa, porque existe un límite físico insuperable: el de la velocidad de la luz.

Ningún cuerpo masivo —como una nave espacial, precisamente— podrá nunca alcanzar esta velocidad, prerrogativa exclusiva de partículas carentes de masa, como los fotones, los cuantos de luz.

Obviamente en el futuro podremos idear métodos de propulsión más eficaces que los actuales y proyectar motores que ahora pueden parecernos de ciencia ficción; y hay en marcha muchas investigaciones y también algunas experimentaciones centradas en alcanzar por lo menos las estrellas más cercanas, pero tememos que los viajes a grandísimas distancias estarán siempre vedados. Aunque, técnicamente, en vez de desplazarnos nosotros de un punto a otro del espacio, podríamos intentar «doblegar» el espacio, variando su curvatura, para acercar dos puntos alejados entre sí (después de todo, la teoría de la relatividad general no lo impide). Esto nos permitiría

recorrer distancias conceptualmente enormes en un tiempo extremadamente limitado. En la práctica, nos moveríamos (¡solo aparentemente!) a velocidades superlumínicas, aunque, en la realidad, nuestra nave espacial continuaría desplazándose a velocidades admitidas por las leyes de la física en un espacio expresamente «encorvado» para facilitarnos la etapa de traslado.

De hecho, hay quien ha intentado en serio proponer un motor de curvatura, mencionado en muchos libros y películas de ciencia ficción, pero sobre todo en la serie de televisión *Star Trek,* e incluso ha hecho cuentas... lástima que estas cuentas demuestren que la cantidad de energía necesaria para hacerlo funcionar es tan grande que quizá nunca seríamos capaces ni de producirla ni de almacenarla para luego poder usarla llegado el caso.

Si luego, desmintiendo cuanto acabamos de escribir, alguien consigue encontrar el modo de realizar el viaje que hemos hecho solo con la fuerza de la imaginación, se presentarán, de todos modos, otros problemas. Qué equipo llevar, por ejemplo, o los trajes, porque no bastará con los espaciales, sino que harán falta también otros para descender en las superficies y explorar los diversos mundos: volcánicos, helados, ácidos, magnéticos, perennemente agitados por tormentas. Prescindiendo de las visitas a corta distancia a estrellas, púlsares, fuentes de rayos X y gamma, agujeros negros pequeños y grandes, porque de estos es preferible mantenerse alejados. Ahora bien, no es que los agujeros negros deglutan necesariamente cualquier cosa que pase cerca de ellos. Si vuestra nave espacial no apunta directamente hacia el horizonte de sucesos y se desplaza a suficiente velocidad, podéis entrar tranquilamente en órbita alrededor del agujero negro y disfrutar de la vista incluso durante un buen rato... ¡pero es necesario que el comandante de vuestra nave esté preparado para afrontar posibles perturbaciones en vuestra ruta orbital!

Y luego: ¿comida y agua? No podemos llevar provisiones que puedan durar una década (de todos modos, serviría de poco, considerando la longitud de ciertos viajes), pero tampoco sabemos cómo y dónde procurárnoslas en el espacio. El agua quizá sí, de alguna manera conseguiríamos extraerla, pero la comida continuaría siendo un problema insuperable. A menos que decidiéramos llevarnos algunas plantas para cultivarlas en el espacio. Y aún más, ¿queremos hablar del oxígeno? Es verdad, podríamos pensar en producirlo directamente en el espacio —ya se han hecho algunos experimentos de este tipo, por ejemplo, en Marte—, pero deberíamos necesariamente detenernos en alguna parte para abastecernos y reemprender el viaje.

Por último, un problema en el que difícilmente se piensa cuando imaginamos viajes semejantes: ¡la frenada! Sí, porque cuando hayáis llegado incluso solo a las inmediaciones de la Luna, o de Marte, por citar dos metas «fáciles», no podéis quedaros tranquilos: hay que posarse suavemente sobre la superficie, o al menos entrar en órbita sin riesgos. Y la maniobra para entrar en órbita alrededor de otro cuerpo o incluso solo para cambiar sencillamente la trayectoria orbital de la nave espacial no es en absoluto sencilla, y sin duda muy distinta de como la muestran algunas películas de ciencia ficción, con muchos efectos especiales espectaculares pero garrafales errores de física clásica. Quizás estaría más contento Einstein, por cómo se describen «sus» agujeros negros, que Newton, lidiando con directores y guionistas sin duda más atentos a los diálogos y a las expresiones de actrices y actores que al respeto de la ley de gravitación universal. Sí, habéis entendido, estamos pensando en la película *Gravity*.

Pero tratemos de imaginar que todos estos problemas han sido resueltos. Llegamos a un exoplaneta gemelo de la Tierra y nos encontramos con otra forma de vida inteligente. Una vez Umberto Eco se preguntó irónicamente cuál sería la primera de estas formas... ¡y la pregunta podría tener sus razones! ¿Qué hacemos? ¿Cómo nos comportamos? ¿Cómo nos comunicamos?

Son todos temas que investigadores de distintas disciplinas ya están estudiando. Porque nunca se sabe. A nuestro primer viaje interestelar —aunque se haga dentro de mil años— siempre es bueno llegar preparados. Y esperamos que con esta lectura al menos os haya entrado la curiosidad por continuar estudiando y profundizando.

Quién sabe si conseguiréis un asiento en uno de los próximos vuelos turísticos espaciales.

¡Buena suerte!

POST SCRIPTUM

Sin duda lo habéis comprendido, pero es mejor no correr el riesgo de malentendidos. Solo el viaje es totalmente fruto de la imaginación. El resto, no: astrobús aparte, para entendernos, cualquier otra información citada en el texto está documentada y disponible en publicaciones científicas.

Por tanto, cuando los astrobuses existan de verdad, podréis usar este libro como guía turística del universo. Conservadlo con cuidado, quizá pueda ser útil a vuestros tataranietos.

APÉNDICE

GLOSARIO

- A -

AGN Acrónimo de *active galactic nucleus,* o sea, «núcleo activo de galaxia». Se llaman así los núcleos especialmente brillantes de algunas galaxias. La intensa radiación electromagnética emitida por estos núcleos no es de origen estelar, sino causada por procesos de acreción de materia en torno a un agujero negro supermasivo. A una galaxia cuyo núcleo (AGN) emite grandes cantidades de radiación se la denomina «galaxia activa».

AGUJERO DE GUSANO Un puente hacia otro universo creado por un agujero negro. Son unas regiones espaciales en forma de tubo (de donde deriva su rocambolesco nombre, traducción del inglés *wormhole),* contempladas por la teoría de la relatividad general, que pueden conectar dos universos completamente separados o dos regiones espacialmente separadas y distantes del mismo universo. También es llamado túnel espaciotemporal.

AGUJERO NEGRO Una masa colapsada gravitatoriamente cuya velocidad de escape es superior a la de la luz, esto es, que ni siquiera la luz consigue escapar de su intenso campo gravitatorio (razón por la cual es llamado «negro»). Un agujero negro está representado por una singularidad espacial de densidad infinita rodeada por un horizonte de sucesos, el límite extremo al que puede llegar la observación. Más allá del horizonte de sucesos, no es posible saber qué ocurre ni en la materia ni en la radiación.

AGUJERO NEGRO MASIVO Agujero negro de masa superior en varios órdenes de magnitud a la del Sol, utilizado en los modelos teóricos de los núcleos activos de galaxias, según los cuales la fuente de energía se debe al movimiento de caída y al consiguiente calentamiento de materia (gases y estrellas) sobre un agujero negro masivo o supermasivo.

ANIQUILACIÓN Mutua destrucción de un par partícula-antipartícula con la creación de rayos gamma o eventualmente de otras partículas de altísima energía. La aniquilación produce una total conversión de la masa de las partículas implicadas en energía, según la equivalencia E = mc2.

ANTIMATERIA Materia compuesta por partículas de masa idénticas a las de la materia ordinaria, pero con otras características físicas opuestas, como, por ejemplo, la carga eléctrica o el espín (momento angular intrínseco). La antimateria puede ser producida en experimentos de física atómica o de partículas, pero se encuentra también en la naturaleza, en los rayos cósmicos y en otros fenómenos de alga energía.

AÑO LUZ La distancia recorrida por la luz en un año terrestre. Equivale a unos 9,5 billones de kilómetros.

ASTEROIDE Cuerpo rocoso de dimensiones y masa reducidas en órbita alrededor de una estrella. En el Sistema Solar, la mayor parte de los asteroides tiene órbitas comprendidas entre las de Marte y Júpiter. Actualmente se han catalogado algunos millares, pero se piensa que existen decenas de miles. También son llamados «planetoides» o «planetas menores». Algunos asteroides son dobles o están dotados de satélites.

- B -

BIG BANG Según los modelos cosmológicos estándar, la explosión de la que se originó nuestro Universo hace unos 13.800 millones de años y que se está expandiendo bajo ese impulso inicial.

BULBO El bulto interior de las galaxias espirales, conocido como *bulge* en inglés, que contiene su núcleo. El bulbo de una galaxia espiral está densamente poblado de estrellas muy viejas, del mismo tipo y edad que las que pueblan el halo galáctico (población II).

- C -

CHANDRASEKHAR, LÍMITE DE Límite superior, equivalente a unas 1,4 masas solares, para que la masa de un objeto pueda resistir el colapso gravitatorio gracias a la presión del gas degenerado de los electrones. Esta es la masa más elevada que puede alcanzar una enana blanca. Este límite lleva el nombre del astrofísico indio de origen paquistaní Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995).

CICLO SOLAR El período, de 11 años de duración, que transcurre entre dos máximos (o mínimos) de la actividad solar. En realidad, puesto que cada 11 años el campo magnético solar invierte su polaridad, la duración del ciclo solar completo es de 22 años.

COLAPSO GRAVITATORIO Imprevista y repentina contracción de una estrella cuando la presión de radiación y la presión del gas caliente, que empujan hacia el exterior, ya no son suficientes para equilibrar el impulso hacia el interior generado por la gravitación.

COMETA Cuerpo menor del Sistema Solar, inestable y poco compacto, compuesto preferentemente por hielo de agua, partículas sólidas y gases moleculares. La mayor parte de los cometas se mueve en órbitas muy elípticas o incluso hiperbólicas. Los cometas que recorren órbitas cerradas (elípticas) representan una fracción menor de todos los cometas conocidos. En cada paso por el perihelio, los cometas se consumen perdiendo parte de su masa. Su vida está estimada en torno al centenar de pasos por el perihelio.

CRÁTER Depresión circular de variada extensión observable en las superficies de muchos cuerpos con corteza sólida, como los planetas terrestres, la Luna, muchos satélites de los planetas gigantes o la propia Tierra. El origen de algunos cráteres es endógeno al cuerpo mismo, o sea, han sido generados por actividades volcánicas; otros —la mayor parte— han sido causados por un impacto, o sea, son la consecuencia de la caída de otros cuerpos sólidos procedentes del espacio interplanetario, como asteroides o cometas (origen exógeno).

CUÁSAR Fuente extragaláctica de extrema luminosidad y de apariencia puntiforme (estelar). La mayor parte de los cuásares tiene espectros muy desplazados hacia el rojo y se encuentran, por tanto, a distancias cosmológicas. Pertenecen a la categoría de los núcleos activos de galaxias (AGN), cuyo motor central es un agujero negro supermasivo. El término «cuásar» deriva de la contracción de la expresión inglesa *quasi-stellar radio source,* «radiofuente (de apariencia) casi estelar». Ahora se prefiere la expresión *quasi-stellar object* (QSO), o sea, «objeto casi estelar», porque existen también objetos de este tipo que no emiten ondas de radio.

CÚMULO (DE GALAXIAS) Los cúmulos de galaxias son agregaciones más o menos extensas de galaxias. Nuestra Galaxia es miembro de un pequeño cúmulo de galaxias (pocas decenas) llamado «Grupo Local», del que forma parte también la galaxia de Andrómeda. El cúmulo de galaxias más cercano es el cúmulo de Virgo, que contiene varios centenares de galaxias.

CÚMULO (ESTELAR) Los cúmulos estelares son agrupaciones de estrellas reunidos en un volumen limitado. Los cúmulos abiertos (o galácticos) contienen desde varias decenas hasta algunos millares de estrellas, generalmente jóvenes, y se encuentran

dispuestos a lo largo de los brazos de las galaxias espirales. Los cúmulos globulares reúnen desde algunos centenares de miles hasta algunos millones de estrellas muy viejas y están distribuidos en el halo de todas las galaxias.

- D -

DEGENERACIÓN Estado de la materia que se verifica cuando las partículas son compactadas hasta el máximo grado físicamente posible y que alcanza densidades elevadísimas, comparables con las del núcleo atómico. En este estado, el comportamiento de la materia se aleja mucho del de la materia ordinaria.

DISCO Referido a una galaxia espiral, la región que ocupa su plano principal, distinta del halo, la región esférica que lo envuelve, y del bulbo, el bulto central del disco, en cuyo centro se encuentra el núcleo de la galaxia. Es en el disco de la galaxia donde se extienden los brazos espirales y se concentra la gran mayoría de las estrellas y de los gases de una galaxia espiral.

DISCO DE ACRECIÓN Anillo de materia que envuelve a una estrella u otro objeto celeste (como un agujero negro), del que cae materia con movimiento en espiral hacia el objeto central. La energía gravitatoria liberada por la materia en caída puede causar la emisión de radiación electromagnética también muy energética, hasta los rayos X.

DOPPLER, DESPLAZAMIENTO En astronomía, el desplazamiento de las longitudes de onda del espectro de una fuente luminosa debido a su movimiento respecto del observador. La observación del desplazamiento Doppler de las líneas espectrales de una estrella o del medio interestelar permite calcular su velocidad radial, o sea, valorar la magnitud de su movimiento a lo largo de la línea de visión. La medición del desplazamiento se realiza comparando el espectro de la fuente con un espectro de laboratorio con las mismas líneas, generado por una fuente en reposo. El desplazamiento hacia el rojo de las líneas espectrales de las galaxias lejanas no se debe al efecto Doppler, sino a un efecto estrictamente cosmológico.

DOPPLER, EFECTO Variación de la frecuencia (o equivalente de la longitud de onda) de las ondas provocada por el movimiento relativo de la fuente respecto del observador. La frecuencia disminuye cuando la fuente se aleja del observador (aumenta la longitud de onda). Aumenta en el caso contrario. En efecto toma su nombre del físico austríaco Christian Johann Doppler (1803-1854).

ECLIPSE Ocultación de un cuerpo celeste por parte de otro que se interpone entre aquel y el observador. En particular, los eclipses solares están causados por el paso de la Luna delante del Sol respecto de la Tierra, mientras que los eclipses de Luna son provocados por la interposición de la Tierra entre el Sol y la Luna. Los eclipses de Luna pueden ser totales (con la Luna completamente inmersa en la sombra de la Tierra), parciales (con la Luna parcialmente inmersa en la sombra de la Tierra en el máximo del eclipse) y penumbrales (con la Luna pasando solo por la penumbra de la Tierra). Los eclipses de Sol pueden ser totales (el observador en la sombra de la Luna), parciales (el observador en la penumbra) y anulares. En particular, en los eclipses anulares el disco solar no está completamente oculto por el disco lunar, de modo que una corona circular (anillo) de fotosfera permanece visible en el máximo del eclipse. Los eclipses anulares se verifican cuando el diámetro aparente de la Luna es menor que el aparente del Sol.

ENANA BLANCA Objeto estelar compacto, de alta densidad. Es el estadio final de una estrella de pequeña masa que ha agotado su combustible nuclear. La presión de degeneración de los electrones impide el colapso gravitatorio.

ESPECTRO Imagen o representación gráfica (diagrama) de la intensidad de la radiación electromagnética de una fuente en función de la longitud de onda o de la frecuencia. Más en general, en física se usa el término «espectro» para referirse al diagrama relativo a cualquier tipo de radiación (corpuscular, electromagnética o acústica) que proporciona la distribución de una magnitud con relación a otra magnitud.

ESTRELLA Cuerpo celeste que produce energía en su interior por medio de procesos de fusión nuclear. Todos los objetos con masa superior al 8% de la masa solar (equivalente a cerca de 80 masas jovianas) se convierten en estrellas. Un cuerpo cuya masa está por debajo de este umbral puede, durante un cierto tiempo, a través del proceso de contracción gravitatoria, calentarse y emitir radiación, pero no conseguirá desencadenar las reacciones nucleares, razón por la cual se la denomina «enana marrón». Con masas aún menores, se habla de planetas.

ESTRELLA DE NEUTRONES Objeto estelar extremadamente compacto, con densidades elevadísimas. Es uno de los posibles resultados de la explosión de una supernova. La presión de degeneración de los neutrones, de los que la estrella está casi enteramente compuesta (obtenidos por la fusión de protones y

electrones, con la consiguiente emisión de neutrinos electrónicos), impide el colapso gravitatorio. Los púlsares son estrellas de neutrones con un intenso campo magnético y alta velocidad de rotación.

ESTRELLA DEGENERADA Estrella colapsada de altísima densidad en que la resistencia a un nuevo colapso gravitatorio es realizada por la presión de degeneración. En particular, en las enanas blancas esta es causada por la degeneración de los electrones (gas degenerado de electrones), mientras que en las estrellas de neutrones es justamente la presión del gas degenerado de neutrones la que resiste a la fuerza de gravedad. También se encuentra materia degenerada en las enanas marrones, en los núcleos de los planetas gigantes y en los núcleos de estrellas en determinadas fases de su recorrido evolutivo.

EXCENTRICIDAD La medición del achatamiento de una órbita. Vale 0 para las órbitas perfectamente circulares, está comprendida entre 0 y 1 para órbitas elípticas (cuanto más se acerca a 1 la excentricidad, más alargada es la órbita), vale 1 para órbitas parabólicas (abiertas) y es mayor de 1 para órbitas hiperbólicas (abiertas). Las órbitas de los planetas son de baja excentricidad. La excentricidad es uno de los elementos orbitales, o sea, de los parámetros que definen completamente la forma de una órbita y su posición en el espacio.

- F -

FISIÓN En física nuclear, la separación del núcleo atómico de un elemento pesado en dos o más elementos más ligeros, generalmente seguida por emisión de energía en forma de rayos gamma o partículas más ligeras.

FORMACIÓN ESTELAR Proceso que desemboca en el nacimiento de una estrella, causado por la contracción gravitatoria de una nube fría y densa de materia interestelar que provoca el calentamiento del gas y la sucesiva ignición de las reacciones termonucleares en su interior.

FOTÓN La partícula (cuanto) mediadora del campo electromagnético. Carente de masa, viaja a la velocidad de la luz. Representa también la descripción corpuscular del campo electromagnético.

FUSIÓN En física nuclear, la combinación de dos o más núcleos de elementos ligeros para dar origen al núcleo de un elemento más pesado. Es seguida por una intensa emisión de energía si se funden elementos más ligeros que el hierro; si no es así, es

preciso suministrar energía para que se produzca el proceso.

- G -

GALAXIA (GENÉRICA) Extenso sistema agrupado de objetos celestes unidos por la recíproca fuerza de gravedad. Una galaxia comprende desde algunos millones hasta algunos billones de estrellas, más una masa variable de gases y polvo interestelar. Las galaxias son esencialmente de tres tipos: elípticas, espirales e irregulares. Las galaxias lenticulares representan el eslabón intermedio entre las elípticas y aquellas en espiral. Las galaxias pueden ser clasificadas también no solo en función de su morfología, sino también atendiendo a otros factores, como por ejemplo la radiación dominante emitida por ellas. Así, una radiogalaxia es una galaxia que tiene una intensa emisión en el campo de las ondas de radio. Las galaxias tienen la tendencia a agruparse en sistemas aún más vastos: los cúmulos y los supercúmulos de galaxias. Nuestra Galaxia, siendo la galaxia por antonomasia, toma, precisamente, el nombre de Galaxia.

GALAXIA (VÍA LÁCTEA) Sistema galáctico que contiene al menos 10.000 millones de estrellas, una de las cuales es el Sol. Es una galaxia espiral normal, con un diámetro de aproximadamente 100.000 años luz. Cerca del 10% de su masa total no se encuentra concentrado en estrellas, sino en gases y polvo interestelar (medio interestelar).

GAS DEGENERADO Gas en que la presión solo depende de la densidad y es independiente de la temperatura. En astronomía, por ejemplo, están en forma de gas degenerado los electrones de una enana blanca y los neutrones de una estrella de neutrones.

GAS INTERESTELAR Gas frío difundido en los espacios interestelares y principalmente compuesto por hidrógeno. El gas interestelar interactúa poco con la radiación, y solo con la de determinadas longitudes de onda, pero a causa de las colisiones es impelido a unirse al polvo interestelar.

GRUPO LOCAL El conjunto de galaxias ligado gravitatoriamente al que pertenece también la nuestra, que, junto con la galaxia de Andrómeda, es uno de los principales miembros del cúmulo. El Grupo Local es un cúmulo de galaxias pobre, de forma irregular, que se encuentra en la periferia del cúmulo de galaxias de Virgo.

- H -

HALO Distribución esférica de estrellas aisladas muy viejas, cúmulos globulares, nubes de gas y materia oscura, centrada en el núcleo de una galaxia. Los astrónomos distinguen entre halo estelar, poblado de objetos luminosos concentrados hacia el centro de la galaxia, y halo oscuro, que se extiende mucho más allá de los límites visibles de una galaxia.

- I -

INTERGALÁCTICO, GAS Materia distribuida en las regiones de espacio entre galaxia y galaxia. Gas intergaláctico de altísima temperatura ha sido observado en los rayos X en grandes cúmulos de galaxias, mientras que en otros cúmulos, como nuestro Grupo Local, podría estar presente en forma de nubes de hidrógeno.

- K -

KUIPER, CINTURÓN DE Región externa del Sistema Solar donde están reunidas miríadas de fragmentos planetesimales, asteroides y núcleos de cometas de diversas dimensiones, algunas incluso comparables con las de los asteroides del cinturón principal. Las órbitas de los objetos pertenecientes al cinturón de Kuiper yacen prácticamente sobre la eclíptica. Es un ancho anillo que se extiende más allá de la órbita de Neptuno y representa una extensión interior y aplastada de la Nube de Oort. El cinturón de Kuiper es la zona de la que proviene la mayoría de los cometas periódicos. Los objetos del cinturón de Kuiper se encuadran en la categoría de objetos transneptunianos, a la que pertenecen también todos los objetos en resonancia orbital con el planeta Neptuno. En concreto, los cuerpos transneptunianos que dan dos revoluciones en torno al Sol en el tiempo en que Neptuno da tres (resonancia orbital 3:2) son llamados «plutinos», porque también Plutón está en resonancia 3:2 con Neptuno. Toma el nombre del astrónomo holandés Gerard Peter Kuiper (1905-1973).

- L -

LENTE GRAVITATORIA Galaxia o cúmulo de galaxias que desvía la radiación proveniente de fuentes lejanas situadas aproximadamente a lo largo de la misma línea de visión. Las

lentes gravitatorias pueden distorsionar, focalizar o separar los haces de luz exactamente de la misma manera que las lentes ópticas normales. La magnitud de la deflexión depende de la masa deflectante, como se deduce de la teoría de la relatividad general, según la cual también los fotones, si bien privados de masa, son desviados de su camino por la presencia de una masa que deforma el espacio-tiempo.

LUMINOSIDAD INTRÍNSECA La cantidad de radiación luminosa efectivamente emitida por una fuente, distinta de la que observamos desde la Tierra (luminosidad aparente). En efecto, una estrella de alta luminosidad intrínseca puede tener una baja luminosidad aparente a causa de su distancia de nosotros. Representa físicamente la potencia de la fuente, o sea, la energía que esta emite por unidad de tiempo.

- M -

MANCHA SOLAR Zona comparativamente oscura (aunque de temperatura ligeramente inferior) de la fotosfera solar que constituye el centro de actividad de intensos campos electrostáticos y magnéticos. En concreto, las manchas solares que yacen sobre un nivel ligeramente inferior respecto del fotosférico están siempre acopladas: una es de polaridad magnética positiva, y la otra, negativa. Las manchas solares se manifiestan con un ciclo periódico de 11 años (ciclo de actividad solar), durante el cual migran de las altas latitudes solares al ecuador solar. Una mancha solar típica tiene una duración de algunos días.

MAREA Variación del nivel del mar debida al movimiento de subida y bajada de la masa fluida por la acción gravitatoria combinada del Sol y la Luna. La oscilación principal se debe al movimiento de la Luna, menos masiva pero mucho más cercana que el Sol. En términos más generales, las mareas son fenómenos que se verifican siempre que un cuerpo extendido se mueve en el campo gravitatorio de otro cuerpo. La parte del primero más cercana a este se ve afectada por una fuerza de atracción gravitatoria mayor que la parte más lejana. Entre los dos extremos opuestos del primer cuerpo a lo largo de la dirección del segundo se produce, por tanto, una fuerza gravitatoria diferencial neta que «alarga» el primer cuerpo en esta misma dirección. En el caso de que las fuerzas de cohesión de este sean inferiores a las fuerzas mareales, el cuerpo se fragmenta. Esto es lo que ocurre cuando un cuerpo supera el límite de Roche del

cuerpo en torno al cual orbita. Las fuerzas de marea dependen de la masa del cuerpo que genera la marea sobre el otro y de la distancia recíproca de los dos cuerpos. Naturalmente, las mareas son recíprocas, en el sentido de que cada uno de los dos cuerpos actúa con fuerzas mareales sobre el otro y viceversa.

MATERIA INTERESTELAR Materia distribuida en el espacio entre las estrellas, principalmente compuesta por gases (99%) y polvo interestelar (1%). Tiene temperaturas y densidades medias muy bajas. En la materia interestelar están comprendidos los rayos cósmicos. A veces se la llama «medio interestelar».

MATERIA OSCURA Materia no luminosa que revela su presencia solo de manera indirecta, a través de la influencia gravitatoria que genera sobre la materia luminosa. Se supone que está compuesta solo en una mínima parte por materia ordinaria, como las enanas marrones, los planetas o el polvo interestelar. Su mayor porcentaje está compuesto por partículas exóticas.

MINIAGUJERO NEGRO Un agujero negro de masa pequeñísima que puede haberse formado en los primeros instantes de vida del universo.

- N -

NEBULOSA Nube de gases y polvo interestelar de forma irregular, generalmente iluminada por las estrellas situadas en sus inmediaciones. Su espectro puede contener líneas de emisión (nebulosa de emisión) o las mismas líneas de absorción de las estrellas iluminadoras, lo que revela el hecho de que la nebulosa refleja simplemente su luz (nebulosa de reflexión). Un tipo particular de nebulosas difusas son las nebulosas oscuras, regiones no luminosas observables por contraste con fondos brillantes. Históricamente, antes de que fuera reconocida su verdadera naturaleza de objetos extragalácticos, las galaxias espirales eran llamadas «nebulosas espirales».

NEBULOSA PLANETARIA Burbuja de gas ionizado y extremadamente rarefacto que envuelve una enana blanca cálida. Emite radiación por fluorescencia, o sea, a través de la absorción de radiación ultravioleta proveniente de la estrella y la sucesiva reemisión en lo visible. La nebulosa planetaria tiene origen en la expulsión de las capas más externas de una estrella en su fase de gigante roja. A este tipo de nebulosa se la llama «planetaria» porque en la observación telescópica puede parecer un pequeño disco planetario, pero no tiene nada que ver con los planetas.

NOVA Tipo de variable cataclísmica en que se manifiesta un repentino e intenso aumento de luminosidad. Las *novae* son siempre binarias interactivas, compuestas habitualmente por una estrella secundaria de secuencia principal y por una primaria enana blanca. La secundaria transfiere materia (normalmente gas de hidrógeno), a través de un disco de acreción, sobre la superficie de la enana blanca. La zona de impacto superficial de la enana blanca puede a veces alcanzar temperaturas susceptibles de desencadenar reacciones termonucleares de fusiones del hidrógeno en helio, cuya liberación de energía es responsable del (y a veces recurrente) aumento temporal de luminosidad del sistema. En estas explosiones, la enana blanca pierde parte de sus capas superficiales.

- O -

OCULTACIÓN Paso de un cuerpo celeste por delante de otro cuerpo celeste, que queda temporalmente oculto de la vista del observador. En sentido estricto, los eclipses son ejemplos de ocultación.

ONDA GRAVITATORIA Trastorno temporal en la estructura del tejido espaciotemporal debido a modificaciones en la distribución espacial de las masas. Es el modo en que se propaga la radiación gravitatoria. Previstas por la teoría de la relatividad general en 1915, tuvo que pasar un siglo para que las ondas gravitatorias fueran detectadas (en 2015) de manera directa.

OORT, NUBE DE Región aproximadamente esférica del Sistema Solar que se encuentra en la periferia extrema de este (en torno a 100.000 unidades astronómicas del Sol). Se piensa que es la zona de la que proviene la mayoría de los cometas. Toma el nombre del astrónomo holandés Jan Hendrik Oort (1900-1992).

- P -

PLANETA Objeto en órbita alrededor de una estrella que, a diferencia de esta, no produce energía mediante fusión nuclear. Para ser definido como planeta, un cuerpo debe poseer una masa suficiente como para conferirle una forma esferoidal y tener su franja orbital libre de otros cuerpos de dimensiones comparables o superiores. En ausencia de esta segunda condición, el objeto, aunque esferoidal, es catalogado como planeta enano.

POBLACIÓN ESTELAR Vasto conjunto de estrellas de todo tipo

pertenecientes a una galaxia, con características similares de edad, distribución espacial, cinemática y metalicidad. Los astrofísicos distinguen las estrellas en dos poblaciones, llamadas «población I» (más joven) y «población II» (más vieja), aunque suponen la existencia de una tercera, llamada «población III», aún más vieja.

POLVO INTERESTELAR Pequeños granos o partículas de materia sólida de dimensiones variables que se encuentran en el medio interestelar. Compuestos principalmente de silicatos, absorben, difunden y polarizan la luz visible de longitudes de onda comparables a sus dimensiones. La presencia del polvo interestelar provoca la disminución y el enrojecimiento de la radiación que la atraviesa.

PROTUBERANCIA Masa de hidrógeno de alta temperatura que se eleva de la cromosfera solar. Las protuberancias pueden ser eruptivas, muy violentas y repentinas, o inactivas, de menor energía pero de mayor duración.

PÚLSAR Término derivado de la contracción de *pulsating radio source* [«radiofuente pulsante»], que se aplica a una clase de cuerpos celestes en rotación rápida caracterizados por la emisión de ondas de radio. Los púlsares son estrellas de neutrones, resultado del colapso gravitatorio de las estrellas que han explotado como supernovas.

- R -

RAYOS CÓSMICOS Partículas subatómicas de alta energía (principalmente protones) que viajan a mucha velocidad en el espacio, penetrando en la atmósfera terrestre.

ROCHE, LÍMITE DE Mínima distancia del centro de un planeta a la que puede orbitar un cuerpo autogravitante (o sea, bajo el efecto de su misma gravedad, como un satélite de grandes dimensiones) sin ser destruido por las fuerzas mareales del propio planeta. Depende de las características físicas (dimensiones, densidad, etc.) del satélite y del planeta en torno al que orbita. El material que constituye los anillos de Saturno no puede agruparse para formar un satélite de grandes dimensiones porque orbita en el interior del límite de Roche del planeta. Toma su nombre del matemático francés Édouard Albert Roche (1820-1883).

- S -

SATÉLITE Cualquier objeto en órbita alrededor de un planeta. Para distinguir los satélites artificiales de los naturales, algunos astrónomos prefieren usar el término «lunas» para los segundos. La Luna es el único satélite natural de la Tierra.

SCHWARSCHILD, RADIO DE El horizonte de sucesos de un agujero negro, o sea, el radio crítico dentro del cual también la luz es atrapada para siempre por la intensa fuerza gravitatoria. El radio de Schwarzschild es directamente proporcional a la masa del agujero negro. Lleva el nombre del astrónomo alemán Karl Schwarzschild (1873-1916).

SINGULARIDAD Punto anómalo del espacio en que la curvatura y otras cantidades físicas asumen valor infinito. En las singularidades ya no sirven las leyes de la física. Los físicos teóricos confían en eliminar las singularidades matemáticas de las soluciones de las leyes físicas con una descripción cuántica de la interacción gravitatoria. Ejemplos de singularidades del espacio-tiempo son los agujeros (densidad infinita) y el instante del Big Bang (densidad, presión y temperatura infinitas).

SISTEMA BINARIO Un sistema gravitatorio formado por dos estrellas en órbita alrededor de un centro de masas común. Se denomina «binarias visuales» a los sistemas cuyos componentes y cuyo movimiento orbital es posible resolver mediante observación en el telescopio. Binarias astrométricas son las estrellas cuya naturaleza dual se deduce de las oscilaciones observadas en su propio movimiento. Binarias espectroscópicas son las estrellas cuya naturaleza dual se deduce de las variaciones detectadas en las velocidades radiales. Al menos la mitad de las estrellas presentes en las cercanías del Sol pertenece a un sistema doble o múltiple. También se las llama «estrellas dobles».

SISTEMA MÚLTIPLE Un sistema ligado, constituido por más de dos estrellas en órbita alrededor de un centro de masas común, que interactúan entre sí a través de la fuerza de atracción gravitatoria recíproca.

SOMBRA Disminución de luminosidad causada por la interposición, entre la fuente de luz y una superficie iluminada, de un cuerpo total o parcialmente no transparente. Si la fuente es puntiforme, la sombra de un objeto es la proyección del objeto mismo sobre la superficie iluminada. Si la fuente no es puntiforme, se forma una zona llamada «de penumbra», constituida por los puntos iluminados solo de una parte de la propia fuente.

SUPERNOVA Estrella que explota de manera violenta e imprevista, aumentando en varios órdenes de magnitud su propia

luminosidad. La mayor parte de la materia que constituía la estrella es eyectada lejos y a gran velocidad por la explosión y acaba conformando una nebulosa a la que se denomina «resto de supernova». En el centro queda, al menos en algunos casos, un núcleo estelar extremadamente denso en forma de estrellas de neutrones. Después del pico alcanzado en el momento de la explosión, la luminosidad de la estrella va atenuándose a lo largo del tiempo con una evolución característica.

SUPERNOVA, RESTO DE La envoltura de materia en expansión expulsada a gran velocidad por una explosión de supernova, que a la observación aparece como una nebulosa gaseosa difusa, a menudo con una estructura en forma de envoltura. Los restos de supernova, conocidos también por el acrónimo SNR (del inglés *supernova remnant),* son en general intensas radiofuentes que obtienen su energía (al menos en algunos casos) de la conversión de la energía rotacional de la estrella de neutrones central en un flujo de partículas de alta energía continuamente aceleradas e introducidas en la propia nube.

- T -

TEMPERATURA EFECTIVA La temperatura efectiva de un cuerpo, como una estrella o un planeta, es la temperatura de un cuerpo negro que emitiría la misma cantidad total de radiación electromagnética (en física, un cuerpo negro es un cuerpo ideal que absorbe toda la radiación y la vuelve a emitir con un espectro típico que solo depende de su temperatura). La temperatura efectiva es a menudo usada como estimación de la temperatura superficial de un cuerpo.

TRÁNSITO El paso de un objeto astronómico de pequeño diámetro aparente por delante de otro objeto de gran diámetro aparente, normalmente referido a los cuerpos del Sistema Solar. Mercurio y Venus pueden transitar sobre el disco solar, y los satélites de Júpiter transitan periódicamente sobre el disco del planeta.

- U -

UNIDAD ASTRONÓMICA La distancia media (en símbolo, au) entre la Tierra y el Sol, equivalente a 149.598.500 km. Es la unidad de medida preferentemente empleada para las distancias en el interior del Sistema Solar: Mercurio, el planeta más interior, dista una media de 0,4 au, mientras que Neptuno, el

planeta que orbita más lejos, se encuentra a una media de 30 au del Sol.

UNIVERSO El conjunto del espacio-tiempo y de toda la energía contenida en él, tanto en forma de radiación de diverso tipo como de materia. Por tanto, el universo está constituido por todo el conjunto de estrellas y planetas, reunidos en galaxias, a su vez agrupadas en cúmulos de galaxias, junto con la materia interestelar e intergaláctica y toda la radiación electromagnética (y no electromagnética) que lo permea. La cosmología es la ciencia que estudia su origen, estructura y evolución.

- V -

VARIABLE, ESTRELLA Cualquier estrella cuya luminosidad varíe con el tiempo, de manera periódica o no. Una estrella puede ser variable por diversos motivos, que determinan su clasificación. En concreto, algunas estrellas son variables porque pertenecen a sistemas binarios en que un componente eclipsa periódicamente al otro (variables eclipsantes o binarias eclipsantes), mientras que otras estrellas son intrínsecamente variables, o sea, su luminosidad varía por motivos inherentes a la estrella.

VELOCIDAD DE ESCAPE La velocidad mínima que necesita un cuerpo para huir definitivamente del campo gravitatorio de otro cuerpo y que depende de la masa de este y de su distancia. La velocidad de escape de la superficie de la Tierra es de 11,2 km/s; la de la Luna, de 2,4 km/s, y la del Sol, de 617,7 km/s.

VELOCIDAD DE LA LUZ Velocidad de una onda electromagnética en el vacío. Es por definición equivalente a 299.792.458 m/s. Todas las partículas carentes de masa (como el fotón) se mueven a la velocidad de la luz.

VÍA LÁCTEA Franja que atraviesa el cielo nocturno, producida por la luz de la miríada de estrellas y nebulosas distribuidas sobre el plano del disco de nuestra Galaxia.

VIENTO ESTELAR Flujo de materia que irradia la superficie de una estrella. El viento estelar emitido por el Sol recibe el nombre de «viento solar». Los vientos estelares son de gran importancia tanto en las fases iniciales de una estrella como en las fases de gigante y supergigante. El viento estelar es uno de los procesos que puede llevar a una estrella a perder parte de la masa en el curso de su evolución.

VIENTO SOLAR Flujo de partículas cargadas que la corona solar libera a gran velocidad. Las auroras polares en la atmósfera terrestre son uno de los muchos efectos provocados por el viento

solar.

BIBLIOGRAFÍA

Las fuentes… y un par de agradecimientos

Que hayáis llegado a leer hasta la bibliografía significa que hemos obtenido un resultado: despertar vuestra curiosidad e incitaros a continuar estudiando y profundizando en los temas que, en estas páginas, un poco por el espacio disponible, un poco por el género divulgativo del libro, solo hemos podido mencionar. Y tal vez no solo estéis interesados en las fuentes no propiamente científicas, sino también en las históricas y, por qué no, literarias sobre las cuales a veces hemos divagado. Por eso se nos ha ocurrido una idea que en principio podría parecer extraña —aunque no tan extraña para este volumen—: crear una bibliografía «mixta», donde las fuentes científicas se funden con las humanísticas, algo así como un intento de recuperar la idea de un saber único, inescindible, omnicomprensivo, como aquel al que se refería el escritor y ensayista británico Charles Percy Snow en su célebre ensayo *Las dos culturas* (publicado por primera vez en 1959), en el que denunciaba justamente la separación entre el saber científico y el humanístico.

En esta lista de títulos encontraréis, por tanto, no solo libros que hablan de astronomía, sino también algunos de ciencia ficción, o de temas muy distintos, como *Las dos culturas,* por ejemplo. Después de todo, también este es un libro fronterizo, siempre a caballo entre ciencia e imaginación.

Pero es importante que sepáis que esta bibliografía, aunque representativa, es, en cualquier caso, un subconjunto de la vasta mole de fuentes consultadas para escribir este texto, fruto no solo de lecturas de múltiples libros, artículos divulgativos y artículos originales (en soporte de papel y digital, en forma de *ebook* o páginas web), sino también —como habréis comprobado leyendo estas páginas — del visionado de películas y series televisivas, de escucha de pasajes musicales, de conversaciones más o menos doctas en familia —y aprovecho aquí la ocasión para dar las gracias a mi mujer y a mis hijos por su paciencia y su constante apoyo— o con algún amigo aficionado a la astronomía, al que también doy las gracias.

Pero, reelaborando a nuestro modo la habitual fórmula que los autores escriben a pie de página en los agradecimientos, si este libro os ha gustado, es mérito de todas las fuentes que hemos utilizado, y si

no os ha gustado, es solo responsabilidad nuestra.

Confiamos en vuestra clemencia.

Adams, D., *Guida galattica per gli autostoppisti. Il ciclo completo,* Mondadori, Milán, 2016.

Antonucci, E., *Dentro il Sole,* Il Mulino, Bolonia, 2014.

Asimov, I., *Fondazione. Il ciclo completo,* Mondadori, Milán, 2020.

— y Silverberg, R., *Notturno,* Bompiani, Milán, 2001.

Bradbury, R., *Cronache marziane,* Mondadori, Milán, 2020.

Chambers, J., y Mitton, J., *Dalla polvere alla vita,* Hoepli, Milán, 2016.

Cimatti, A., *L'Universo oscuro,* Carocci, Roma, 2020.

Eco, U., *Il pendolo di Foucault,* La nave di Teseo, Milán, 2018.

Galilei, G., *Opere* (2 volúmenes), UTET, Turín, 2009.

García Márquez, G., *Cronaca di una morte annunciata,* Einaudi, Turín, 2017.

Gleick, J., *Caos. La nascita di una nuova scienza,* Rizzoli, Milán, 2018.

Gott, J. R., *La ragnatela cosmica,* Bollati Boringhieri, Turín, 2019.

Green, L., *Viaggio al centro del Sole,* Il Saggiatore, Milán, 2018.

Gribbin, J., y Gribbin, M., *Oltre la Via Lattea,* Dedalo, Bari, 2019.

Hoskin, M. (ed.), *Storia dell'astronomia,* Rizzoli, Milán, 2017.

Jayawardhana, R., *Strani mondi,* Codice, Turín, 2015.

Malvaldi, M., y Marmi, S., *Caos,* Il Mulino, Bolonia, 2019.

Mammarella, N., *Nella mente dell'astronauta,* Carocci, Roma, 2020.

Marconi, A., *I buchi neri,* Il Mulino, Bolonia, 2019.

Martin, G. R. R., *Il trono di spade. Un gioco di troni,* Mondadori, Milán, 2019.

Murdin, P., *La vita segreta dei pianeti,* Corbaccio, Milán, 2019.

Pitoni, R., *Storia della fisica,* STEN, Turín, 1911.

Ridpath, I., y Tirion, W., *Stelle e pianeti,* Editori Riuniti, Roma, 2020.

Rigutti, M., *Storia dell'astronomia occidentale,* Giunti, Florencia, 1999.

Ryan, C., *Il giorno più lungo,* Rizzoli, Milán, 2016.

Sagan, C., *Contact,* Bompiani, Milán, 1988.

— *Pale Blue Dot,* Random House, Nueva York, 1994 (en inglés).

Snow, C. P., *Le due culture,* Marsilio, Venecia, 2005.

Sobel, D., *Pianeti,* Rizzoli, Milán, 2005.

Swift, J., *I viaggi di Gulliver,* Feltrinelli, Milán, 2014. [Existe edición en castellano, *Los viajes de Gulliver,* Alianza Editorial, 2014]

Tinetti, G., *I pianeti extrasolari,* Il Mulino, Bolonia, 2019.

Tolkien, J. R. R., *Il Signore degli anelli,* Bompiani, Milán, 2020.

Trefil, J., *Atlante dello spazio,* White Star, Novara, 2018.

Verdet, J.-P., *Storia dell'astronomia,* Longanesi, Milán, 1995.

Verne, J., *Dalla Terra alla Luna,* Rizzoli, Milán, 2018. [Existe edición en castellano, *De la Tierra a la Luna,* Alianza Editorial, 2011]

Vonnegut, K., *Ghiaccio-nove,* Feltrinelli, Milán, 2013.

Weir, A., *L'uomo di Marte,* Newton Compton, Roma, 2014.
Wells, H. G., *La guerra dei mondi,* Minimum Fax, Roma, 2016. [Existe edición en castellano, *La guerra de los mundos,* Alianza Editorial, 2021]

Edición en formato digital: 2022

Título original: *Guida turistica dell'universo. Alla scoperta dello spazio, fra mondi alieni e mostri del cielo*

Quest'opera è stata tradotta con il contributo del Centro per il libro e la lettura del Ministero della Cultura italiano.

Esta obra ha sido traducida con la contribución del Centro para el libro y la lectura del Ministerio de Cultura italiano.

© Copyright © (2021) by Giunti Editore S.p.A., Firenze-Milano www.giunti.it
© de la traducción: Juan Carlos Gentile Vitale, 2022
© Alianza Editorial, S. A., Madrid, 2022
Calle Juan Ignacio Luca de Tena, 15
28027 Madrid
www.alianzaeditorial.es

ISBN ebook: 978-84-1362-831-8

Está prohibida la reproducción total o parcial de este libro electrónico, su transmisión, su descarga, su descompilación, su tratamiento informático, su almacenamiento o introducción en cualquier sistema de repositorio y recuperación, en cualquier forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, conocido o por inventar, sin el permiso expreso escrito de los titulares del Copyright.